

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИМПОРТОНЕЗАВИСИМОГО РАЗВИТИЯ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ БОЛЬШИХ ИНДУСТРИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ СИСТЕМ

Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
zvt@ipu.ru, fish@ipu.ru

*Аннотация. Для больших промышленных систем (на примере АЭС) рассмотрены направления импортонезависимого развития облачных инфраструктур для цифровых двойников высокой вычислительной сложности. Предложены методы повышения производительности путём гибридизации облачных серверов с применением перспективной элементной базы – однокристалльных компьютеров-ускорителей с массовым динамически масштабируемым многоядерным параллелизмом, сопрягаемых с отечественными микропроцессорами.*

*Ключевые слова: глобальная компьютерная среда, облачные системы, цифровые двойники, АЭС. импортонезависимость, гибридные вычислительные комплексы, компьютер-ускоритель с массовым многоядерным параллелизмом, виртуализация облачных ресурсов, метод динамического масштабирования массового многоядерного параллелизма.*

## Введение

Глобальная компьютерная среда (ГКС) стала основой цифровизации и увеличения размеров различных социально значимых распределённых цифровых экосистем – коммуникационных и маркетинговых, технических, финансовых и экономических, систем госуправления, управления производственными и бизнес-процессами и др.

Быстро растущая ГКС де-факто стала фундаментальным и доминирующим фактором воздействия на социотехносферу в целом. При этом, стихийный, внутрисистемно несбалансированный рост ГКС с её крайне разнородными аппаратными, программными и информационными ресурсами при неконтролируемом расширении сфер её влияния «неожиданно» оборачивается опережающим ростом и кризисом перепроизводства слабо организованной информации [1]. Неконтролируемый рост информационного шума глобальной цифры снижает качество процессов управления функционированием и развитием социотехногенной среды. Как следствие – прогрессирующее нарастание социо-экономической неустойчивости из-за общесистемной несовместимости, растущих противоречий традиционных (нецифровых) и новейших (цифровых) принципов, методов и моделей управления устойчивым функционированием и развитием социотехногенных систем [2].

Информационное пространство WWW привнесло в социотехносферу беспрецедентный сетевой феномен глобальной информационной связности, когда «всё влияет на всё и сразу» [3]. Глобальная связность, в охвате социотехносферы в целом, кардинально меняет её кибернетические свойства. Социотехногенная среда в целом становится изначально неустойчивой: малые случайные причины локальных противоречий могут вызывать неконтролируемые глобальные лавинные реакции деструктивных последствий в различных сферах жизнедеятельности. Эти и другие приобретения априори незаявленных «побочных эффектов» глобальной цифры «внезапно» и в растущем количестве выдвигают принципиально новые требования к методам, моделям и способам управления устойчивым развитием социотехносферы в условиях глобальной связности [2]. К сожалению, современная кибернетика в первую очередь и наука в целом за три десятилетия стихийной экспансии ГКС не сумели «поместить» её (как единый объект исследований) в традиционные понятийные базисы и арсеналы научных знаний и методов досконального изучения причин положительных и отрицательных следствий научно-технического прогресса. ГКС как предмет научных исследований и «рукотворная» техногенная среда с беспрецедентными темпами роста и масштабами охвата и противоречивого влияния на социотехносферу остаётся главным вызовом 21 века. Сверхзадачей в поисках ответов на эти вызовы становится системно-целостная кибернетическая трансформация ГКС в универсально программируемую и кибербезопасную управляющую среду, которая сделает возможным полномасштабное использование растущего системообразующего потенциала глобальной цифры для управления безопасно-устойчивым функционированием и развитием социотехносферы в условиях глобальной информационной связности.

В данной работе с опорой на общепринятую концепцию развития промышленно значимых систем «Индустрия 4.0» [4] исследуются начальные шаги и возможные пути перехода к формирующимся в настоящее время принципам новых этапов эволюции таких систем в рамках концепции «Индустрия

5.0» [5]. Предлагаемый подход в отличие от многих исследований на эту тему основан на фундаментальных закономерностях развития ГКС и направлен на кибернетическое обоснование возможностей и путей трансформации ГКС (посредством концептуального реинжиниринга) в системно-целостную, бесшовно программируемую и кибербезопасную сетевую среду управления устойчивым развитием социотехносферы. С учётом особой системообразующей роли технологий цифровых двойников (ЦД) в развитии индустриальных систем [6] в применениях к объектам и системам высокой структурно-динамической сложности, требующих «тяжёлых» вычислений [7], показаны пути наращивания вычислительной производительности посредством использования однокристалльных компьютеров-ускорителей с массовым многоядерным параллелизмом, динамически масштабируемое использование которого эффективно осуществляется в режимах балансировки вычислительной нагрузки и каналов ввода/вывода данных.

## 1. Предпосылки кибернетизации ГКС

Одно из главных кибернетических качеств социумов — это их структурная самоорганизация в социосистемы, функционал которых обеспечивает многоагентный сбор информации, её передачу, накопление и переработку в целях управления устойчивым функционированием и развитием растущего многообразия технологий удовлетворения социального спроса. При этом особое значение имеет качество накопленной информации, а также её трансформация в социальные навыки, знания и технологии устойчивого развития социотехногенных процессов производства-потребления.

Следует отметить, что опережающее, вместе с тем системно несбалансированное, развитие прогрессирующей компьютерной индустрии сопровождается снижением устойчивости мировой экономики и социосистем в целом. Поэтому, не смотря на смену многих поколений компьютеров, сетей и бизнес-моделей их использования, на глобальном уровне продолжается воспроизводство парадокса Роберта Солоу [8]: по рынку в целом инвестиции в компьютеризацию производств не приводят к увеличению прибыли или производительности труда, но парадоксальным образом приводят к увеличению инвестиций в компьютеризацию производств.

Де-факто легализованная разнородность аппаратных, программных и информационных сетевых ресурсов на всех системотехнических и ментальных уровнях является общей фундаментальной причиной внутрисистемных дисбалансов в развитии ГКС, проявляющихся в отсутствии её системной целостности и функциональной полноты (универсальной программируемости). Главный и парадоксальный общесистемный дисбаланс трёх десятилетий развития крайне разнородной ГКС в том, что, будучи составленной из универсально-программированных компьютеров, связанных сетями, ГКС в целом не обладает системно-целостным свойством бесшовной программируемости [3].

Системно несбалансированное (стихийное) развитие ГКС делает невозможным (в виду крайней разнородности сетевых ресурсов) кумулятивное использование её совокупного системообразующего потенциала в качестве универсальной, бесшовно программируемой компьютерной среды для управления устойчивым функционированием и развитием сколь угодно больших социотехногенных систем в условиях глобальной информационной сильносвязности [3]. Несбалансированное развитие входит в противоречие с фундаментальным кибернетическим принципом Эшби [9], который декларирует необходимое условие управляемости систем. Оно состоит в следующем: разнообразие пространства состояний в управляющей части систем не должно быть меньшим разнообразия состояний управляемой части систем. Универсальная цифровизация принципа Эшби в применении к локализуемым системам с управлением осуществляется [10] посредством микроконтроллеров – универсальных компьютерных устройств с микропроцессорными архитектурами, со встроенными средствами цифрового сопряжения с управляемыми объектами. В микроконтроллерах (в памяти достаточного объёма) хранится все разнообразие состояний управляемого объекта. Благодаря универсальной программируемости микроконтроллеров в их памяти могут храниться и программно исполняться алгоритмы управления разных объектов. Универсальность цифровизации принципа Эшби обеспечивается возможностями программной настройки алгоритмов управления на особенности локализуемых объектов. В применении к распределённым в компьютерных сетях системам с управлением универсальная цифровизация принципа Эшби в настоящее время отсутствует [10]. Причина: в таких системах управляющая и управляемые части являются сетевыми распределёнными подсистемами, в сетевых узлах которых находятся универсальные компьютерные устройства, в памяти которых размещаются фрагменты общего текущего состояния распределённых системы.

В отсутствие фундаментального свойства универсальной программируемости совокупных сетевых ресурсов существующей ГКС универсальная цифровизация принципа Эшби остаётся неосуществимой [10]. По этой причине разработка больших распределённых систем с управлением осуществляется на

основе весьма и весьма затратных технологий интероперабельности путём системотехнической интеграции изначально разнородных сетевых ресурсов ГКС [11].

Главное и необходимое требование к таким системам – априорная системотехническая ориентация функционала создаваемых распределённых систем на разнообразные предметные области их применения. При этом системотехнические реализации интеграции разнородных сетевых ресурсов жёстко закрепляются в структуре аппаратных, программных и системных решений. Для этого используется большой арсенал сложных и дорогостоящих технологий системно-функциональной интеграции сетевых ресурсов изначально разнородных, потому несовместимых, на многих уровнях – аппаратных, программных и информационных.

В условиях легализованной разнородности ресурсов ГКС основным инструментарием для создания таких систем де-факто стали облачные системы [10]. Одним из ключевых направлений исследований в наших разработках является выявление закономерностей развития больших распределённых индустриально значимых систем, развивающихся с нарастающим влиянием ГКС.

## **2. Эволюция больших индустриально значимых систем**

С увеличением размеров распределённых систем при их структурных трансформациях проблемы системно-функциональной интеграции сетевых ресурсов требуют особых решений. Для преодоления барьеров комбинаторной сложности при создании и широком использовании технологий ЦД большие разнородные вычислительные среды, воплощаемые в сетях, должны обладать регулярными свойствами системной и вычислительной масштабируемости, достигаемые посредством виртуализации компьютерных и сетевых ресурсов [12 - 15]. Эти дополнительно привносимые и весьма непростые в реализации системные требования необходимы для снижения затрат на системно-функциональную интеграцию разнородных ресурсов до приемлемых уровней.

Проблематика глобальной цифровой трансформации техногенных систем в киберфизические системы, функционирующие с требуемой безопасностью и эффективностью, представленная в концепте «Индустрия 4.0», предполагает неограниченное использование растущего потенциала ГКС для реализации методов и технологий системно целостной виртуализации сложных распределённых систем промышленной направленности посредством применения методов и технологий ЦД.

Наращивание масштабов распределённых информационных и вычислительных систем стало возможным на основе технологий интеграции сетевых ресурсов в рамках концепции облачных вычислений, которые основаны на централизованных клиент-серверных сетевых архитектурах.

Сетевые облачные системы открыли новые этапы глобализации универсально программируемой алгоритмической переработки распределённой информации. В качестве серверов используются мощные универсальные компьютеры с многоядерными архитектурами, дополненные сетевыми средствами связи между собой и внешним миром, а также системами долговременного хранения больших и сверхбольших объёмов данных. Общая схема облачных платформ с архитектурами «Клиент-Сервер» воплощает принцип асимметричной поляризации сетевых узлов таких систем путём пространственного разделения на серверную часть и клиентскую. В серверной части централизованным образом концентрируются компьютерные средства для разнообразной алгоритмической обработки больших потоков клиентских запросов, а также для накопления всех объёмов значимых данных, циркулирующих в своих экосистемах. Такая централизация наряду с достоинствами имеет и принципиальные недостатки – риски утраты или компрометации больших объёмов данных, растущие нагрузки на каналы связи при увеличении числа клиентских узлов. Клиентские узлы имеют санкционированный сетевой доступ к серверам и могут наращиваться в больших количествах. Алгоритмический функционал отдалённого доступа клиентских мест к серверному центру сужен до разнопрофильных интерфейсов, которые специализированы на предоставлении информационно-алгоритмических услуг в режимах «тонкого клиента».

Со второй половины 00-х прогресс архитектур облачных систем, с высокой рентабельностью предоставляющих массовые комплексные услуги <информация+алгоритмика> [12], до сих пор остаётся ведущим индустриальным трендом в развитии компьютерно-сетевых технологий, с помощью которых осуществляется очаговая цифровизация социотехносферы посредством формирования облачных экосистем различной направленности.

Многие критически важные отрасли промышленности, включая сферы производства энергии, в том числе атомная энергетика, опираются на весьма дорогостоящие и потенциально небезопасные физические объекты своей инфраструктуры. В концепции «Индустрия 4.0» одним из перспективных направлений развития разных отраслей промышленности является создание ЦД [4], которые представляют собой системно-интегрированную совокупность цифровых моделей узлов и подсистем

реальных объектов, связанных интерфейсами обмена данными с физическими оригиналами [15 -18]. Виртуальное функционирование ЦД узлов и подсистем осуществляется одновременно и совместно с реальными узлами и подсистемами посредством обмена данными в реальном времени, что позволяет:

- осуществлять непрерывный контроль функционирования объекта на разных этапах его жизненного цикла и с минимальными затратами прогнозировать развитие нештатных ситуаций;
- осуществлять поиск и оптимизацию маршрутов выхода из критических ситуаций;
- обеспечивать безопасность при модернизации программно-аппаратных средств [19].

Сложные системы на всех этапах своего жизненного цикла (проектирование, функционирование, эксплуатация, модернизация, утилизация [17]) требуют комплексно-многофакторного, всё более «тяжёлого» в вычислительном отношении [7] обеспечения необходимых уровней безопасности и эффективности. Например, виртуально-цифровая АЭС (ВЦАЭС – расчётная часть ЦД АЭС) моделирует работу более 300 систем АЭС и включает расчёт более 3,5 млн переменных [13].

Одним из главных ограничений дальнейшего развития облачных архитектур, предоставляющих пакеты услуг <информация+алгоритмика> стала чрезмерная централизация серверной обработки распределённой информации. Она показала свою эффективность в больших распределённых системах и большими потоками независимых запросов к серверам, в которых массовая клиентская часть отделима от серверной посредством функционирования в режимах «тонкого клиента». Такой режим предписывает полномасштабный перенос алгоритмического функционала в серверную часть.

В основу нового тренда развития облачных систем положены требования к частичной децентрализации путём добавления иерархии дополнительных сетевых слоёв периферийного окружения центрального облака. Дополнительные слои постоблачных систем связывают объекты распределённых промышленных систем в функционально целостные производственные комплексы посредством аппаратно-программных интерфейсов сопряжения периферийных узлов с производственными объектами [20]. Примеры применения частично децентрализованных систем – «Интернет вещей» (IoT), умные города, умные сети, виртуальная/дополненная реальность, беспилотные транспортные средства и другие сферы, охватываемые концептом «Индустрия 4.0», который определяет стратегию цифровой трансформации систем производственной направленности в безопасно и эффективно функционирующие/развивающиеся киберфизические системы.

Частично децентрализованные системы выводят на рынки новое качество цифровых услуг в виде системно увязанного триплета <информация+алгоритмика+ЦД> [12], которое необходимо для осуществления этой стратегии. Технологии ЦД в импортнезависимом исполнении обретают новые возможности для своего развития в качестве цифровой опоры для минимизации издержек в трансформации критически важных производств в киберфизические системы новых поколений.

Многослойная сателлитная децентрализация остаётся облако-центричной, поскольку реализуема только с принципиальными (по причине растущей с опережением комбинаторной сложности) ограничениями на объёмы «центробежных» расширений вычислительных ресурсов серверного центра.

Сверхзадача импортнезависимого развития концепции ЦД, а также технологий их воплощения состоит в том, чтобы динамично, с приоритетами на критических направлениях развития социотехносферы, структурировать и направлять неограниченно растущий системообразующий и вычислительный потенциал глобальной цифры, концентрируемый в ГКС. Обеспечить эффективность и безопасность процессов цифровой трансформации растущего разнообразия социотехногенных систем в глобально сильносвязную и системно сбалансированную киберсоциофизическую метасистему [1, 3]. Продвижение глобальной цифровой трансформации техногенных систем в киберфизические системы – один из характерных трендов современного развития ГКС. На высшие приоритеты выходят требования к функционированию с требуемой безопасностью и эффективностью, представленные в концепте «Индустрия 4.0» [4]. Чрезмерно централизованные облачные системы не отвечают требованиям киберфизических систем. Важно также отметить, что в условиях глобальной информационной сильносвязности обеспечение безопасно-устойчивого и эффективного функционирования/развития сложных промышленных систем концепта «Индустрия 4.0» без массового применения технологий ЦД не представляется возможным.

### **3. Гибридизация облачных серверов с применением компьютеров-ускорителей с массовым многоядерным параллелизмом**

Компания NVIDIA в начале 10-х впервые вывела на рынки линейку общедоступных однокристальных компьютеров-ускорителей с массовым многоядерным параллелизмом класса GP GPU (General-Purpose Graphics Processing Unit) [21]. Чипы таких ускорителей массово используются

в составе гибридных компьютерных систем различных классов от ПК и встраиваемых систем до мощных серверов и суперкомпьютеров. Производительность таких систем на задачах с массовым параллелизмом может на порядки превышать предельную производительность хост-машин.

Новейшие исследования фирмы NVIDIA обозначили одно из главных направлений продвижения облачных систем в индустриальные сферы, в которых в текущих и перспективных разработках требуется повышение вычислительной производительности на порядки. Исследования направлены на гибридизацию серверных архитектур облачных систем [22] путём сопряжения ускоряющих блоков видеокарт (с тысячами ядер), построенными с применением чипов GP GPU с массовым многоядерным параллелизмом, с уже виртуализированными серверными ресурсами облачных систем.

В ориентации на импортонезависимое развитие облачных технологий и технологий ЦД далее рассмотрим возможности привнесения системных функций внутричиповой виртуализации массового многоядерного параллелизма применительно к перспективным однокристальным компьютерам-ускорителям, в основу которой положена масштабируемая многопроцессорная SIMD-архитектура отечественного компьютера-ускорителя ПС-2000 [23, 24]. Гибридные вычислительные комплексы на основе многопроцессорных компьютеров-ускорителей ПС-2000 выпускались большой промышленной серией в отсутствие мировых аналогов. Высокая эффективность многопроцессорной архитектуры ПС-2000 подтверждена широкой практикой применения в различных сферах народного хозяйства.

На рис. 1а в обобщённом виде представлена multi-SIMD структура однокристального компьютера-ускорителя с массовым многоядерным параллелизмом ПС-2000М, предлагаемого к разработке [25]. Она составлена из базовых вычислительных модулей (БВМ), в основу которых положена апробированная многопроцессорная архитектура ПС-2000. Одно из ключевых преимуществ предлагаемой multi-SIMD структуры состоит в её структурной масштабируемости. Данное качество позволяет эффективно наращивать масштабируемую производительность однокристального ускорителя по мере увеличения количества вычислительных ядер, размещаемых на кристалле ускорителя. Такое масштабирование производительности становится возможным, начиная с технологии 90 нм (256/512 ядер на кристалле [25]). На технологиях менее 10 нм число ядер в чипе может достигать многих тысяч и десятков тысяч.

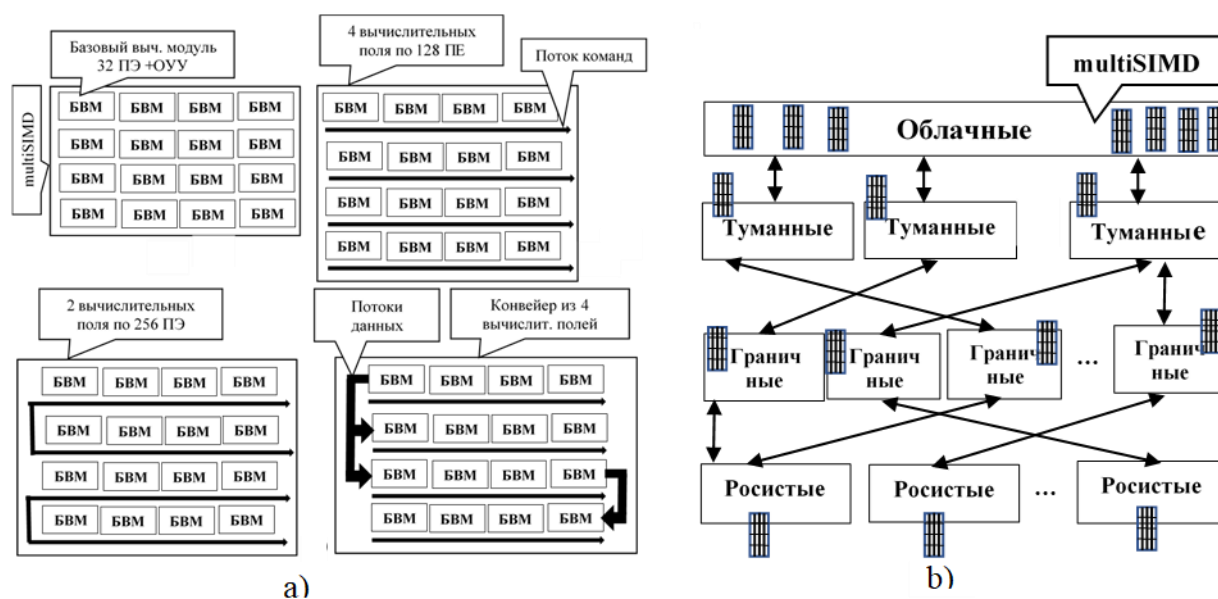


Рис. 1. Многоядерный компьютер-ускоритель ПС-2000М: а) с внутрикристалльной программной реконфигурацией (проект), б) PS(П)C-as-a-Service на базе постоблачных вычислений [20]

В отличие от подхода NVIDIA облачная виртуализация структурно-масштабируемого параллелизма ускорителей ПС-2000М предполагает переход на более глубокие уровни архитектурного погружения в ресурсы массового многоядерного параллелизма. Если виртуализация GPU-as-a-Service в архитектуре GP GPU осуществляет масштабирование на блоковом уровне, то в нашем случае виртуализация PS(П)C-as-a-Service воплощает масштабирование многоядерного параллелизма на внутричиповом уровне над множеством БВМ (имеющих 32/64 ядра) (рис. 1б), а в перспективе с включением в пространство виртуализации вычислительных ядер, из которых составлены все БВМ.

Импортонезависимая гибридизация серверов и около-серверных компьютерных устройств в постоблачных системах позволит кардинально расширить диапазоны производительности облачных

систем на базе предлагаемых компьютеров-ускорителей с массовым многоядерным параллелизмом. Такое решение позволит на мировом концептуальном уровне облачного прогресса расширять диапазоны масштабирования вычислительной производительности.

#### 4. Балансировка облачных сервисов с массовым многоядерным параллелизмом

На примере умножения двух квадратных матриц  $C=A*B$  рассмотрим метод балансировки времени вычислений (арифметической обработки) и ввода-вывода для однопроцессорного вычислительного устройства (ОВУ), а также многопроцессорного вычислительного устройства (МВУ). Используются следующие обозначения:  $T_{alu}$  - общее время вычисления всех элементов результирующей матрицы,  $T_{i/o}$  - общее время ввода-вывода всех элементов матрицы,  $\tau_{alu}$  - временной интервал массового выполнения двойной вычислительной операции умножения-сложения оператора  $a*x+b$ ,  $\tau_{i/o}$  - временной интервал выполнения ввода-вывода элементов матрицы,  $N$  - размер каждой из трех квадратных матриц  $A, B, C$ ,  $P$  - количество процессорных элементов (ПЭ) в МВУ,  $N_b$  и  $P_b$  - размер матриц и число ПЭ, при которых достигается баланс (равенство) времени вычислений и ввода-вывода, выполняемых параллельно. При реализации алгоритма умножения матриц размера  $N$  на ОВУ (рис. 2) суммарное время вычисления  $T_{alu} = \tau_{alu} \times N^3$  равно времени последовательного ввода-вывода элементов матрицы -  $T_{i/o} = \tau_{i/o} \times N^2$ . Благодаря одновременному выполнению вычислений и вводу/выводу данных достигается балансировка  $T_{alu}(N_b) = T_{i/o}(N_b)$ .

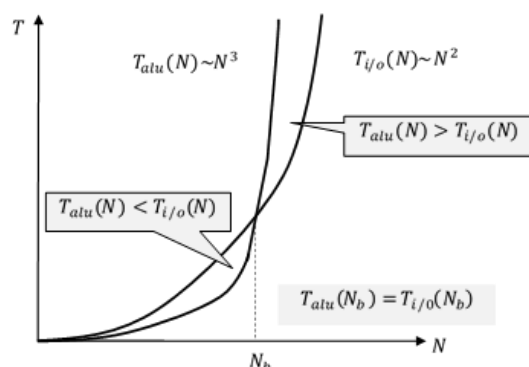


Рис. 2. Соотношение между временем вычислений и временем ввода-вывода на ОВУ

Соотношение временных параметров  $\tau_{alu}$  и  $\tau_{i/o}$  с размером матрицы ( $N$ ) имеет вид:  $N_b = 3 \times (\tau_{i/o}/\tau_{alu})$ . Это означает, что для ОВУ балансировка зависит от размерности матрицы  $N_b$  и определяется кратностью превышения скорости ввода-вывода данных над скоростью арифметической обработки. При реализации умножения матриц на МВУ, когда все ПЭ полностью загружены, время обработки сокращается в  $P$  раз:  $T_{alu}(N, P) = \frac{\tau_{alu} \times N^3}{P}$ . Условие балансировки имеет вид  $T_{alu}(N_b, P_b) = T_{i/o}(N_b) \tau_{alu} \times \frac{N_b^3}{P_b} = \tau_{i/o} \times 3 \times N_b^2$ . Это означает взаимосвязь между архитектурными ( $P$ ) и временными ( $\tau_{i/o}, \tau_{alu}$ ) параметрами и параметром задачи - размером матриц  $N$ :  $N_b = 3 \times \left(\frac{\tau_{i/o}}{\tau_{alu}}\right) \times P_b$ .

Это соотношение показывает, что в МВУ балансировка времени обработки и ввода-вывода достигается на значениях  $N_b$ , которые растут пропорционально увеличению числа ПЭ  $P_b$ .

Развитие данной балансировочной модели открывает возможности для формирования многофакторных зависимостей с целью оптимизации/балансировки структурных решений компьютерных архитектур с массовым многоядерным параллелизмом. При этом могут учитываться как параметры вычислительных задач, определяющие их сложность, приоритеты, стоимость и т.д., так и технологические параметры их реализации СБИС, а также другие параметры. Критериальные функции оценки качества искомых конфигураций многоядерных ускорителей могут быть построены в виде линейных или нелинейных весовых функций учитываемых параметров.

Выделим два направления такого развития. Первое - проектирование архитектуры однокристалльных структурно масштабируемых МВУ с массовым многоядерным параллелизмом. Второе - облачная виртуализация и динамическое масштабирование массового многоядерного параллелизма в задачах предоставления облачных сервисов по запросу пользователей для решения «тяжёлых» вычислительных задач при создании ЦД различного назначения.

В части проектирования архитектуры СБИС однокристалльных многопроцессорных ускорителей развитие данной балансировочной модели открывает возможности для оптимизации сбалансированных конфигураций не только с учётом большего числа структурно-динамических параметров ускорителя и параметров задачи (размерность, вычислительная сложность, особенности областей применения и эксплуатации микросхем и т.д.), но и с введением таких технологических параметров изготовления СБИС, как ограничения по количеству внешних контактов в микросхемах, ограничения по длине внутренних соединений, энергопотребление микросхем, многослойность и т.д.

При этом открываются возможности для оптимизации структурно масштабируемых компьютерных архитектур, ориентированных на создание семейства однокристалльных компьютеров-ускорителей с массовым многоядерным параллелизмом при реализации микросхем на разных поколениях СБИС-технологий. Другая сфера применения моделей балансировки структурно-динамических, технологических и потребительских параметров связана с новыми этапами развития облачных систем с внедрением сетевой постоблачной многоуровневой (иерархической) организации. Такие облачные системы новых поколений предназначены для создания крупных распределенных киберфизических систем промышленного и иного назначения с высоким уровнем автоматизации и роботизации. Технологии виртуализации ресурсов облачных серверов, включая ресурсы обработки данных, хранения и сетевых коммуникаций, имеют принципиальное значение для масштабирования крупных киберфизических экосистем. Виртуальное пространство, охватывающее серверные ресурсы, обеспечивает основную системообразующую функцию облачных систем – динамическое масштабирование и конфигурирование серверных ресурсов в соответствии с требованиями, полученными в каждом сервисном запросе, с последующим предоставлением результатов ответов потребителям на заказанные алгоритмические/информационные сервисы.

Новые поколения частично децентрализованных постоблачных систем с иерархической организацией призваны обеспечить в режиме реального времени контроль функционирования и развития крупных киберфизических систем на всех этапах их жизненного цикла. При этом решающее значение в таких системах имеют технологии создания ЦД.

Цифровые модели все более разнообразных и сложных агрегатов, функционирующих в сетевых узлах таких облачных систем, требуют не только практически неограниченного увеличения вычислительной производительности, но и расширения диапазонов виртуализации и масштабирования многоядерных ресурсов облачных систем на порядки. Такой прирост динамически масштабируемой производительности должен быть обеспечен за счёт импортонезависимого роста тиражей и разнообразия применений чипов ускорителей общего назначения с массовым многоядерным параллелизмом, воплощённых сотнями, тысячами и десятками тысяч вычислительных ядер.

Следует отметить, что предлагаемый проект однокристалльного компьютера-ускорителя предполагает архитектурно-аппаратную поддержку внутрикристалльной виртуализации массового многоядерного параллелизма с целью последующей интеграции его в общее виртуальное пространство ресурсов облачного сервера с гибридными архитектурами.

## **5. Краткий обзор возможностей расширения сфер влияния облакоцентричных экосистем и перспектив перехода к технологиям концепции «Индустрия 5.0»**

Одна из главных целей концепта «Индустрия 4.0» – возможно более полное воспроизведение физического мира в цифровой среде посредством технологий ЦД [26]. Однако многим компаниям и предприятиям ещё далеко до её достижения. Мировой рынок цифровых двойников в 2019 году составлял 3,8 млрд долл. США, а к 2025 году он должен достичь 35,8 млрд долл. США.

Согласно исследованию Gartner [26]: внедрение цифровых двойников IoT распространяется среди многих поставщиков. Внедрение ЦД становится синонимом внедрения Интернета вещей (IoT): 26% респондентов заявили, что уже реализовали цифровые двойники, а 59% либо находятся в процессе реализации, либо планируют её на следующий год. Это говорит о том, что, хотя применение ЦД все ещё находится на ранних стадиях, предприятия уже начали широко использовать их для решения таких задач, как оптимизация обслуживания активов или дифференциация продукции. Большинство производителей согласны с тем, что аналитика и прозрачность, обеспеченные киберфизическими системами, позволяют улучшить качество принимаемых решений. Однако пока далеко не все смогли решить эту задачу – во многом потому, что создать полноценного цифрового двойника не так просто. Сложность окружающей среды затрудняет моделирование и управление. Как воспроизвести то, что постоянно меняется и развивается? Стандарты и операционная совместимость облегчают этот процесс, поскольку снижают затраты и сложность благодаря понятному плану действий.

Сделать оборудование «умным», оснастить машины датчиками, подключить их к Интернету вещей и использовать ИИ для их интеллектуализации – вот основа цифровой трансформации промышленности [27]. Ключевое значение имеет свойство интероперабельности открытых систем [11], а также облачные платформы, частично нейтрализующие [10] тяжёлые (комбинаторно сложные) проблемы интеграции крайне разнородных сетевых ресурсов, в рамках своих экосистем обеспечивают гибкость и масштабируемость доступного функционала и вычислительной/системной производительности. Но возможности существующих облачных систем ограничены. Облако может быть сложным. Облачные стратегии могут создавать проблемы с управлением данными. Как показало исследование Cloud Industry Forum [28], только половина опрошенных руководителей считают, что внедрение облака оказало значительное влияние на трансформацию и эффективность бизнеса. Вывод был сделан такой: работа в этом направлении ещё не завершена. Масштабы внедрения высоки, но технологии миграции приложений на облачные ресурсы с воплощением всё более сложных ЦД требуют дальнейшего совершенствования. В условиях глобальной информационной связности «все влияет на всё и сразу», будь то технологии или люди. Именно в этом направлении должна развиваться новая концепция «Индустрия 5.0». Это новый вид промышленной революции, который объединяет технологические инновации с человеческими ценностями [29].

Основные принципы концепта «Индустрии 5.0» включают в себя:

- Человеческое влияние. Создание условий для безопасного и эффективного взаимодействия между человеческой и техногенной средами в режимах использования лучших качеств обеих сторон.
- Устойчивое развитие. Использование технологий для уменьшения экологического воздействия на окружающую среду и повышения энергоэффективности.
- Массовая персонализация. Создание систем, которые позволят массово производить персонализированные продукты и услуги с использованием цифровых технологий.
- Синергия между человеком и машиной. Использование современных технологий для автоматизации производственных процессов при сохранении ведущей роли человека.

Концепция «Индустрия 5.0» уже начинает проникать в различные отрасли, такие как здравоохранение, транспорт, сельское хозяйство и производство, в том числе и в атомную энергетику.

Атомная энергетика [30] рассматривается как одна из самых экологически чистых и безопасных, особенно с внедрением замкнутого ядерного топливного цикла. Ядерное топливо – это самое концентрированное с точки зрения запасённой энергии топливо, в миллионы раз концентрированное углеводородного. Развитие АЭС на базе реакторов малой и средней мощности позволяет обеспечивать электроэнергией и теплом удалённые регионы. Атомная энергетика – надёжный источник электроэнергии, который обеспечивает стабильные поставки электроэнергии вне зависимости от погодных условий. При этом АЭС позволяют производить не только электричество, но и тепло, водород, а также опреснять воду. Сейчас в мире работают 439 ядерных реакторов, которые производят 10% всей электроэнергии. АЭС могут стать основным производителем электроэнергии в ближайшие десятилетия, однако для этого потребуются преодолеть скепсис, связанный с потенциальными угрозами. Стратегия развития ядерной энергетики в ближайшие десятилетия должна содержать обоснование трёх составляющих [30]: безусловной безопасности, экологичности в смысле минимизации или полного отсутствия отходов и экономической эффективности. Это важнейшие специфические требования атомной энергетики ходе рассмотрения перспектив отраслевого применения отдельных новых принципов концепции «Индустрия 5.0» с необходимым наследованием апробированных технологий безопасных управления АЭС. В отличие от концепции «Индустрия 4.0», в которой создание больших распределённых индустриально значимых систем базируется на использовании сетей с иерархическими клиент-серверными архитектурами, концепция «Индустрия 5.0» «погружает» самые разные по составу и масштабу цифровые модели виртуального мира в плоские (одноранговые) сети Peer-to-Peer [31]. Исследования [32, 33] свидетельствуют о том, что в отличие от иерархических сетей с чётко выраженной направленностью управляющих потоков сверху вниз, по довольно жёстким вертикалям от высшего менеджмента к менеджменту низшего звена, в плоских (одноранговых) сетях, доминирующих почти повсеместно в отраслях концепции «Индустрия 5.0», ключевой особенностью является отсутствие «ответственного лица», поскольку руководящие функции обладают свойством перемещаться от одного узла сети к другому по мере продвижения информационных потоков среди равных, а не иерархических агентов. Но как при этом обеспечивается итоговая ответственность за деловые операции в одноранговых сетях Peer-to-Peer?



## 6. Направления трансформации ГКС для системно-целостного и функционально-полного решения проблематики 5.0

Наши исследования фундаментальных системотехнических закономерностей основных стадий развития ГКС [1-3, 10, 12, 23, 25, 34-37] показывают, что существующая ГКС с крайне разнородными аппаратными, программными и информационными сетевыми ресурсами, априори не обладающая свойством системной целостности и функциональной полноты, не может служить универсальной технологической средой для сквозного и полномасштабного решения проблематики, обозначаемой в концепции «Индустрия 5.0». Для конструктивного ответа на итоговый вопрос предыдущего раздела требуется концептуальный реинжиниринг ГКС [34], в результате которого станет возможным формирование в сколь угодно больших сетях ГКС единого бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых и параллельных вычислений для решения всего разнообразия задач цифровой трансформации с использованием технологий ЦД.

Приведём основные положения, положенные в основу предстоящего реинжиниринга ГКС.

### 6.1. Обобщение классической модели универсальных вычислений

В настоящее время инструментарий для глобально распределённых вычислений в сетях создаётся по разнородным, изначально несовместимым моделям и развивается как слабо контролируемая совокупность трудно интегрируемых технологий и поэтому изначально не обладает свойством структурной и системной целостности. Отсюда комбинаторная сложность задач программирования и интеграции распределённых систем, которая выражается чрезмерной трудоёмкостью и себестоимостью их разработок. Полномасштабное воплощение моделей ЦД больших распределённых систем в крайне разнородных ресурсах ГКС невозможно. Причина – комбинаторная сложность системно-функциональной интеграции разнородных сетевых ресурсов. В отсутствие верхних ограничений на размеры систем и количества вовлекаемых для их реализации сетевых узлов затраты средств и времени на функциональную интеграцию разнородных сетевых ресурсов могут превышать любые установленные пределы. Одной из главных причин комбинаторной сложности задач интеграции распределённых в сетевых ресурсах данных, программ, процессов и систем является разнородность форм представления и способов обработки компьютерной информации (программ и данных). Избыточное разнообразие форматов компьютерной информации создаёт в глобальной компьютерной среде эффект непрерывно воспроизводимого «информационного шума», который принципиально неустраним в рамках известных технологий. Влияние шума быстро нарастает по мере роста масштабов распределённых систем, что является кибернетическим фактором кардинального снижения качества управления в больших распределённых системах. Первоочередные проблемы на пути к единому алгоритмическому пространству цифровой трансформации социотехносферы – выявление и устранение первопричин непрерывного воспроизводства разнородности сетевых ресурсов и построение обобщённой модели распределённых/параллельных вычислений, которая математически регламентирует структурные формы представления данных и программ и распространит свойство универсальной бесшовной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров на ресурсы сколь угодно больших сетей. В перспективе такая модель должна стать универсальной основой для реализации бесшовного программирования вычислений в распределённых средах.

Сети общего назначения в большей своей части составлены из универсальных компьютеров с микропроцессорными архитектурами, построенными на основе модели Дж. фон Неймана, которая представляет собой классическую аксиоматику универсальных машинных вычислений и несёт в себе два принципиальных ограничения:

- свойство универсально программируемости реализуется только во внутренних ресурсах изолированных компьютеров, что не позволяет регулярным образом распространять свойство «бесшовной» программируемости на совокупные ресурсы компьютеров, связанных сетями;
- отсутствует математическая регламентация инженерного воплощения аппаратных средств и структурных форм представления информации в памяти, что является причиной непрерывного воспроизводства разнородности компьютерных архитектур и форм представления данных, программ, процессов и систем (отсюда произрастают фундаментальные причины чрезвычайной разнородности ГКС и комбинаторной сложности функциональной интеграции её ресурсов).

В [1-3, 10, 35-37] представлено математическое обобщение модели фон Неймана на основе компьютерного исчисления древовидных структур (ИДС), которое позволило:

- ввести математически замкнутые формы представления структурно-сложной информации и, тем самым, устранить избыточные степени свободы управления вычислениями, скрытые в

классических постулатах управления вычислениями посредством манипуляций машинными ресурсами, которые открывают неконтролируемые пути непрерывного воспроизводства разнородных форм представления данных и программ;

- распространить бесшовным образом свойство универсальной программируемости с внутрикомпьютерных ресурсов на ресурсы сколь угодно больших сетей.

## 6.2. Основная цель реинжиниринга ГКС

Реинжиниринг ГКС направлен на инженерное воплощение предложенной модели бесшовно программируемых и кибербезопасных распределённых вычислений в сколь угодно больших одноранговых (P2P) компьютерных сетях. Эта модель построена на основе компьютерного базиса ИДС [35] путём «поглощающего» математического обобщения модели Дж. фон Неймана – классической модели универсального компьютера. Классическая модель реализуется компьютерами с микропроцессорными архитектурами, которые лежат в основе практически всех сетевых узлов ГКС.

Принципы распространения формализма ИДС на распределённые вычислительные сетевые ресурсы изложены в [1-3, 35, 36]. При этом достигается бесшовное и кибербезопасное распространение свойства универсальной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров на ресурсы сколь угодно больших сетей. Для этого с использованием базовых функций управления протоколом TCP/IP обеспечивается формирование единого адресного пространства распределённой памяти всех компьютеров, связанных сетями, участвующих в распределённой обработке. Единое адресное пространство, охватывающее память всех доступных компьютеров, позволяет программисту «бесшовно», в едином логическом базисе, работать с древовидными структурами, размещаемыми как в памяти собственного компьютера, так и в памяти отдалённых компьютеров. Единое («бесшовное») адресное пространство оперативной памяти компьютеров, связанных сетями, состоит из двухкомпонентных адресов. Первая компонента – уникальный сетевой IP-адрес компьютеров, вторая – адреса ячеек их оперативной памяти [1-3, 35, 36].

Распространение свойства универсальной программируемости с внутрикомпьютерных ресурсов на распределённые сетевые ресурсы предполагает следующее. Все ячейки оперативной памяти отдалённых компьютеров, охваченные единым адресным пространством, становятся доступными с каждого из компьютеров. Различные данные, обрабатываемые программой, целиком или своими компонентами могут распределяться по различным компьютерам таким образом, что адресный доступ к ним из программы может осуществляться «бесшовно», т.е. без применения дополнительных языковых/системотехнических средств. Например, в выражении  $C:=A+B$  все три операнда могут находиться в ОЗУ трех разных компьютеров, операция будет выполнена так, как если бы все они находились в памяти одного компьютера. С точки зрения программиста сеть полностью прозрачна. Такое свойство «бесшовности» относится не только к арифметическим, логическим или символьным выражениям, но и к командам условного перехода, циклам, вызовам подпрограмм (с передачей фактических параметров, находящихся в разных компьютерах), к операторам ввода/вывода, позволяющим читать/записывать файлы, расположенные на разных компьютерах.

## 6.3. К универсальному математически однородному алгоритмическому пространству цифровой трансформации больших структурно сложных систем

Универсальная модель бесшовного программирования распределённых вычислений построена путём минимальной коррекции постулатов классической модели. Проведённое обобщение обеспечивает [35,36] бесшовное распространение свойства универсальной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров на ресурсы сколь угодно больших сетей. На основе построенной модели распределённых вычислений в [37] предложены архитектурные принципы построения нового класса сетевых компьютеров (с немикропроцессорной архитектурой). Такие компьютеры позволяют формировать в ресурсах существующей ГКС математически однородное, бесшовно программируемое и кибербезопасное алгоритмическое пространство распределённых/параллельных вычислений. В этом пространстве сложность компьютерно-сетевого воплощения социотехногенных систем перестаёт существенным образом зависеть от их размера. Новый класс компьютеров с немикропроцессорной архитектурой становится технологической основой реинжиниринга ГКС [34].

Математическая замкнутость нового алгоритмического пространства и устранение в нём комбинаторной роста сложности с увеличением размеров систем открывает пути к полномасштабному воплощению в ГКС моделей управления безопасно-устойчивого развития социотехносферы, функционирующей в условиях глобальной информационной связности. Предлагаемые подходы открывают пути к формированию принципиально обновлённой ГКС. Она должна стать системно-

целостным и универсальным компьютерно-сетевым инструментом цифровой трансформации социотехногенной среды, способным обеспечить кумулятивное использование совокупного, неограниченно-растущего и качественно обновлённого системообразующего потенциала ГКС для решения всего многообразия проблем управления устойчиво-безопасным развитием социотехносферы, рассматриваемых в концепте «Индустрия 5.0».

## 7. Заключение

Представлена не имеющая аналогов концепция системно сбалансированной цифровой трансформации социотехносферы путём формирования и полномасштабного использования в ГКС универсального, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства цифровой трансформации. Это пространство открывает возможности эффективного применения совокупных ресурсов ГКС, с принципиально новыми системообразующими качествами системной целостности и функциональной полноты для воплощения всего многообразия моделей устойчивого развития, отвечающих требованиям концептов «Индустрия 4/5.0».

Подходы к решению задач цифровой трансформации социотехносферы, излагаемые в предлагаемой в концепции, основываются на кибернетической интерпретации фундаментальных закономерностей развития ГКС. Показаны причины воспроизводства разнородности ГКС и пути их устранения. Исследованы особенности общесистемного дисбаланса функционирования и развития ГКС. Показаны возможности перехода к сбалансированному развитию. Идентифицирован феномен глобальной информационной сильносвязности, показано его дестабилизирующее воздействие на социотехносферу. Обосновываются возможности реинжиниринга ГКС, направленного на формирование в ГКС единого, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства цифровой трансформации в архитектуре одноранговых сетей Peer-to-Peer. В этом пространстве становится возможным создание и развитие (с минимальными издержками) сколь угодно больших социотехногенных распределённых систем, функционирующих в условиях глобальной информационной сильносвязности в режимах системно сбалансированного использования взаимодополняющих преимуществ информационно-управляющего потенциала человеческой и компьютерной сред. Дальнейшее развитие предложенной концепции потребует разработки и развития кибернетических моделей устойчивого развития социотехносферы и соответствующих математических методов, а также средств компьютерного моделирования.

## Литература

1. *Затуливетер Ю.С.* Проблемы глобализации парадигмы управления в математически однородном поле компьютерной информации // Проблемы управления. 2005. Ч. I. – N 1. – С. 1-12; N 2. Ч. II. – С. 13-23.
2. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Универсальное алгоритмическое пространство распределённых и параллельных вычислений // Информационные технологии и вычислительные системы. 2018. N 2. - С. 78-93.
3. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Проблемы программируемости, безопасности и надёжности распределённых вычислений и сетевидного управления // Проблемы управления. 2016. Ч. 1. N 3. С. 49-57; Ч. 2. N 4. С. 58-69.
4. *Алленых М.А., Осецкая М.М.* Industry 4.0 в ядерной энергетике: экономическая эффективность цифровизации отрасли // Друкеровский вестник. 2020. N 6 – С. 29-47.
5. *Gajdzik B.* Industry 5.0 as a new concept of development within 2 high volatility environment: about the Industry 5.0 3 based on political and scientific studies // Scientific papers of Silesian university of technology. Organization and management series. 2023. N. 169 – P. 255-279.
6. *Дозорцев В.М.* Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. // Автоматизация в промышленности. 2020. Часть 1. N 9. – С. 3-11. Часть 2. N 11. – С. 3-10. 2021. Часть 3. N 1 – С. 3-12.
7. *Байдаров Д.Ю., Абакумов Е.М., Файков Д.Ю.* Программное обеспечение «тяжелого» класса: возможности импортозамещения // Вопросы инновационной экономики. 2022. Том 12. N 1. – С. 295-316.
8. *Solow R.* You can see the computer age everywhere but in the productivity statistics? -1987.
9. *Эйбл У. Р.* Введение в кибернетику, ИЛ, М., 1959, 432 с.
10. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* К компьютерно-сетевым архитектурам для цифровой трансформации больших систем // Программные системы: теория и приложения. 2020. т. 11, N 3(46). – С. 85–131.
11. *Олейников А.Я.* Стандартизация для обеспечения интероперабельности в современных условиях // ИТ-Стандарт, 2023, № 2, С. 10 – 18.
12. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* К однокристалльным компьютерам-ускорителям с масштабируемым многоядерным параллелизмом для создания цифровых двойников больших систем (на примере АЭС) // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды Шестнадцатой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2023. С. 1208-1219.

13. Дорохова И. Заглянуть в будущее. Виртуально-цифровая АЭС помогает прогнозировать поведение ее реального прототипа // Вестник атомпрома. 2021. N 10. – С.14-18. URL: [https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2021/12/VA10\\_Book\\_spread.pdf](https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2021/12/VA10_Book_spread.pdf).
14. «Росатом» разработает цифровые двойники АЭС малой мощности - Техэксперт / URL: <https://cntd.ru/news/read/rosatom-razrabotaet-cifrovye-dvoyniki-as-maloy-moschnosti>.
15. Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Степанов В.Н. Технология распределенной разработки ПО для АСУ ТП АЭС с использованием виртуализации и цифровых двойников // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 98-102.
16. Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф. Применение цифрового двойника в жизненном цикле АСУ ТП АЭС // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: материалы II Международной научно-технической конференции. – Минск: БГУИР, 2021. – С. 193-197.
17. Панне И.Н., Володин В.С. Применение математических моделей на различных стадиях жизненного цикла российских АСУ ТП АЭС// Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: материалы II Международной научно-технической конференции. – Минск: БГУИР, 2021. – С. 182-188.
18. Прохоров А.Н., Лысачев М.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. -М.: ООО «АльянсПринт», 2020. -401 с.
19. Полетыкин А.Г. Элемент цифровой индустрии 4.0: виртуальная суперкомпьютерная модель для сопровождения и модернизации сложных систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): материалы Одиннадцатой междунар. Конфер. – М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 1. – С. 54-59.
20. Ray P. P. An Introduction to Dew Computing: Definition, Concept and Implications // IEEE Access, Vol. 62017. DOI: 10.1109/ACCEDESS.2017.2775042, P. 723-737.
21. Fung J., Mann S. Using Multiple Graphics Cards as a General Purpose Parallel Computer: Applications to Computer Vision // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2004), Cambridge, United Kingdom. – 2004– Vol. 1, P. 805–808.
22. Expand Horizons with NVIDIA in the Cloud. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/gpu-cloud-computing/>
23. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Артамонов С.Е., Козлов В.А. Элементы стратегии и архитектурные предпосылки опережения в области однокристальных многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом // Информационные технологии. 2014. N 2. Приложение. – С. 1-32.
24. Wolcott P., Goodman S. E., High-speed computers of the Soviet Union // Computer. –1988. –Vol. 21, N 9. – P. 32-41.
25. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Развитие импортонезависимой элементной базы для поддержки технологий «цифровых двойников» (на примере задач АСУ ТП АЭС) // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022): труды Пятнадцатой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1060-1067.
26. Уилер М. Индустрия 5.0 — развивающаяся концепция. – 2021. – URL: <https://www.idexpert.ru/reviews/Industriya-5-0---razvivayushchayasya-kontseptsiya/?ysclid=1w6le3h2ll258450566>.
27. Индустрия 5.0: что это такое и каково ее будущее? 15.11.2023. URL: <https://www.itweek.ru/digitalization/article/detail.php?ID=227964>.
28. Cloud Forum IP Ltd. 2023. URL: <https://cloudindustryforum.org/wp-content/uploads/2023/04/Breaking-new-ground-with-cloud.pdf>.
29. Маковецкий, С.А. Продолжение эволюции: сравнение Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 в контексте современных требований // Устойчивое развитие экономики: состояние, проблемы, перспективы : сб. тр. XVII международной научно-практической конференции, в 2 ч.– Пинск : ПолесГУ, 2023. – Ч. 2. – С. 228–231.
30. Полякова М. Новая энергия // Вестник Атомпрома. 2022. N 1. – С. 16-19.
31. Розанова Н.М. Индустрия 5.0: золотой век или прыжок в темноту? // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023 N 6. – С. 61–77.
32. Aguirregabiria V., Gu J., Luo Y., Mira P. Diffusion of COVID-19 in Social and Production Networks: Simulation Evidence from a Dynamic Model // Annals of Economics and Statistics. 2021. N 142. P. - 179–210.
33. Herskovic B., Ramos J. Acquiring Information through Peers // The American Economic Review. 2020. Vol. 110 N 7. -P. 2128–2152.
34. Zatuliveter Yu.S., Fishchenko E.A. Towards Strategic Reengineering the Global Computer Environment for Control of Sustainable Development of Social Systems // IFAC-PapersOnLine. -М.: Elsevier, -2021. Vol. 54(13) -P. 129-133.
35. Затуливетер Ю. С. Компьютерный базис сетцентрического управления. // Технические и программные средства в системе управления, контроля и измерения: труды российской конф. с междунар. уч. в 2 т. - М.: ИПУ РАН, 2010.- С. 17–37.
36. Затуливетер Ю.С., Топорищев А.В. Язык ПАРСЕК: программирование глобально распределенных вычислений в модели исчисления древовидных структур // Проблемы управления. 2005. N 4. – С. 12-20.
37. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Семенов С.С. Принципы формирования универсального алгоритмического пространства распределенных и параллельных вычислений на основе немикропроцессорных компьютерно-сетевых архитектур // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 6. – С. 3-10.