Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко

К компьютерно-сетевым архитектурам для цифровой трансформации больших систем

Аннотация. На основе математического обобщения классической модели универсального компьютера Дж. фон Неймана в статье предложен общий подход к устранению причин воспроизводства разнородности аппаратных, программных и информационных ресурсов в глобальной компьютерной среде (ГКС). Обобщённая модель позволяет бесшовно расширять свойство универсальной программируемости с внутрикомпьютерных ресурсов на сколь угодно большие сети. При этом кибербезопасность кардинального повышается за счёт аппаратного воплощения "тяжёлых" системных функций, программно выполняемых в операционных системах.

Анализ тенденций развития больших распределённых систем показал, что существующие технологии функциональной интеграции разнородных ресурсов ГКС (Grid, Cloud, пиринговые сети) приблизились к пределам своих возможностей увеличения масштабов таких систем. Дальнейшее увеличение их размеров требует неприемлемых затрат на преодоление крайней разнородности и обеспечение кибербезопасности.

Причины разнородности ГКС фундаментальны. Они скрыты в логике фоннеймановских оснований микропроцессорных архитектур. Сетевые протоколы TCP/IP в глобальных масштабах легализуют разнородность, а также эвристические методы интеграции разнородных ресурсов.

Первоначальные принципы формирования ГКС не предназначались для системно-целостного решения проблем создания сколь угодно больших распределённых систем в ГКС. Предложенная модель открывает возможности для воплощения в ГКС математически-однородного, универсального, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых вычислений. С устранением разнородности на уровне массовых приложений кардинально снижаются затраты на создание/развитие всего разнообразия сколь угодно больших распределённых систем.

Ключевые слова и фразы: глобальная компьютерная среда, большие распределённые системы, цифровая трансформация, разнородность, интеграция сетевых ресурсов, исчисление древовидных структур, модель распределённых вычислений, бесшовное программирование, немикропроцессорная архитектура, кибербезопасность, универсальное алгоритмическое пространство распределённых вычислений.

Введение

Понятие «большие системы» в данной работе распространяется на распределённые социотехнические системы разнообразного назначения с большим количеством компонентов, взаимодействующих между собой через компьютерные сети, а в своих массовых конфигурациях — через глобальную компьютерную среду (ГКС).

Согласно концепциям «Интернет Всего» (IoE) и «Интернет вещей» (IoT) компонентами таких систем являются субъекты, участвующие в процессах переработки сопутствующей информации, и различного назначения объекты — от простейших периферийных устройств узловых компьютеров, до устройств управления движением, автономных роботов и роботизированных агрегатов со сложными технологическим процессами и др. Компьютеры в узлах сетей могут служить не только интерфейсом взаимодействия субъектов между собой и с машинной средой, но также управлять функционированием «своих» локальных объектов и их взаимодействиями с объектами других узлов сети.

В ходе взаимодействия большого количества связанных через ГКС компонентов осуществляется сбор и переработка информации в целях управления согласованным функционированием и взаимодействием компонентов, направленных на решение требуемых задач в разнообразных сферах — социальные коммуникации и службы, производство и бизнес, госуправление, финансы и экономика, медицина, образование, транспорт, безопасность и др.

Цифровая трансформация — это глобальный тренд качественно нового этапа массовой компьютеризации с более высокими уровнями интеллектуализации, которые в растущей степени обеспечивают автономное выполнение компьютерами и сетями рутинных функций переработки информации, в том числе в целях управления.

Цифровая трансформация обеспечивает переход к новым более гибким и эффективным моделям создания, модернизации и расширения сфер влияния социальных и техногенных систем. Новые модели направлены на адаптацию больших систем к быстрым и масштабным изменениям глобального информационного контекста, в котором они функционируют и развиваются.

Наращивание темпов и масштабов цифровой трансформации, а также качественного повышения её системообразующих возможностей, требует увеличения размеров распределённых систем, совершенствования структур управления и расширение их функциональных возможностей, в том числе «интеллектуальных».

Продвижение цифровой трансформации в решающей степени связано с доступными системообразующими возможностями ГКС и моделями управления устойчивым развитием социотехнических систем.

В работе показывается, что главным препятствием на путях развития больших систем становятся *внутрикомпьютерные и внутрисистемные дисбалансы стихийного расширения ГКС*.

В ходе своего стихийного, системно несбалансированного развития опережающий количественный рост размеров ГКС не сопровождался качественным совершенствованием её общесистемных свойств и возможностей.

Укажем на четыре критических фактора, имеющих фундаментальное значение, через которые проявились внутренние дисбалансы развития ГКС:

- (1) непрерывное воспроизводство *разнородности одновременно на всех системных уровнях*, начиная с аппаратного;
- (2) составленная из универсальных компьютеров связанных сетями, ГКС в целом не обладает системно-целостным свойством *«бесшовной» универсальной программируемости, которым обладает каждый её узел*;
- (3) неконтролируемый рост экспоненциальных потоков и объёмов слабоформализованной информации, мало пригодной для алгоритмической обработки, на порядки превышает совокупные социально-субъектные возможности её переработки в целях управления устойчивым развитием социосистем;
- (4) с увеличением размеров и масштабов применения ГКС в условиях крайней её разнородности *проблемы обеспечения кибербезопасности становятся практически неразрешимыми*.

На внешних — социальных — уровнях внутренние дисбалансы ГКС по перечисленным причинам становятся причиной нарастающего снижения устойчивости социосистем и мировой экономики, которое, происходит на фоне ускоряющейся экспансии ГКС.

О снижении устойчивости говорит серия финансово-экономических потрясений с нарастающими масштабами, начавшаяся в 2000 году: «пузырь доткомов», «ипотечный кризис» и др. Переставая поддаваться политэкономическим методам регулирования, кризисные проявления сопровождаются нарастанием торговых и «гибридных» войн всех со всеми.

Всё это заставляет думать, что *стихийное, несбалансированное развитие ГКС становится новейшим фактором мирового влияния и одной из главных причин снижения устойчивости социосистем*.

Первоочередной задачей стабилизации и восстановления устойчивости мировой социосистемы становится глубокий реинжиниринг компьютерно-сетевой архитектуры ГКС, который позволит произвести её внутрисистемную балансировку и решить комплекс проблем, связанных с устранением причин, вызывающих вышеперечисленные критические факторы.

Являясь корневой системообразующей средой для воплощения всего разнообразия больших систем «прикладных» уровней, ГКС «передаёт» каждой создаваемой и функционирующей в ней распределённой системе свои глобальные внутренние дисбалансы.

Эти дисбалансы являются причиной комбинаторной сложности функциональной интеграции крайне разнородных сетевых ресурсов, кризиса перепроизводства информации, неконтролируемого роста сложности проблем обеспечения кибербезопасности, а также многих других, до сих пор нерешённых внутрисистемных проблем балансировки сильносвязанных ресурсов ГКС.

И чем больше масштабы «прикладных» систем, тем сильнее негативные системные последствия наследуемых ими от ГКС дисбалансов. Каждая из таких систем создаётся, как правило, по сугубо «индивидуальному» проекту с «одноразовым» (под проект) трудно унифицируемым набором стандартов и разнородных ИТ.

Дисбалансы ГКС в своих внутренних и внешних проявлениях делают невозможным долгосрочное продолжение стихийного роста больших систем, поскольку это сопряжено с неприемлемыми затратами ресурсов и времени на их цифровую трансформацию.

Цели работы:

- выявление и исследование фундаментальных аспектов проблем цифровизации больших систем с учётом основополагающих возможностей и принципиальных ограничений природных (субъектных) и искусственных (компьютерных) носителей свойства информационной универсальности (раздел 1);
- выявление и анализ закономерностей развития ГКС, причин и последствий стихийного формирования и несбалансированного развития ГКС, идентификация диспропорций в её развитии, а также причин их возникновения и путей устранения (раздел 2);
- анализ принципиальных общесистемных ограничений дальнейшего развития существующих компьютерно-сетевых архитектур, по которым реализуются большие распределённые системы с использованием имеющихся технологий функциональной интеграции разнородных ресурсов ГКС (раздел 3);

- формирование общего подхода к построению компьютерно-сетевых архитектур, направленных на устранение диспропорций развития ГКС, которые открывают возможности воплощения в ГКС универсального, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых вычислений (раздел 4), позволяющего
 - обеспечить кумулятивное использование совокупных ресурсов ГКС,
 - кардинально снизить трудоёмкость создания и цифровой трансформации сколь угодно больших систем переработки глобально распределённой информации.

1. Фундаментальные аспекты проблем цифровой трансформации больших систем

Цифровая трансформация рассматривается нами не только как отображение реальных объектов в цифровое пространство ГКС с целью формирования «цифрового дубликата» реального мира. Это ещё и стратегия обеспечения необходимых условий и формирования универсального инструментария управления устойчивым развитием всего разнообразия сильносвязных систем переработки глобально распределённой информации.

Стратегическая цель цифровой трансформации — системно-целостное взаимодополняющее объединение максимальных системообразующей потенциалов природной (субъектной) и искусственной (компьютерной) информационной универсальности.

1.1. Информационная универсальность

Одно из главных кибернетических качеств социумов — это их самоорганизация в социосистемы, функционал которых обеспечивает многоагентный сбор информации, её передачу, накопление и переработку в целях управления устойчивым функционированием и развитием всего разнообразия социально значимых систем. При этом особое значение имеет качество накопленной информации, а также её трансформация в социальные навыки, знания и техногенные процессы.

До появления компьютеров структуры систем управления социально значимыми процессами могли формироваться только на основе уникальных способностей человека к универсальному восприятию и переработке информации посредством антропоцентрических моделей управления. В таких моделях исполнение массовых операций переработки информации в каждом звене разных уровней управления осуществляется непосредственно человеком.

В основе антропоцентрических моделей лежит *природная монополия человека на универсальность восприятия и переработки информации*. В докомпьютерные времена такие и только такие модели могли использоваться для обеспечения устойчивого развития социосистем.

С появлением ГКС род Homo Sapiens лишил себя *природной монополии* на информационную универсальность, которая до сих пор «единовластно» определяла прогресс социосистем посредством антропоцентрических моделей развития.

Пропускная способность в части передачи и преобразования информации, а также информационная ёмкость компьютеров и ГКС в целом уже на многие порядки превосходит ограниченные природой информационные возможности человека и социумов.

При этом ГКС привнесла в социумы другое исторически беспрецедентное новшество. Это — новый кибернетический феномен, обозначаемый термином «*глобальная информационная сильносвязанность*». Данный феномен идентифицирован в работе [1] и привносит новое понятие, которое используется для системно-целостного анализа различных аспектов функционирования и развития ГКС. Оно обозначает характеристическое свойство глобального и сверхбыстрого взаимного информационного влияния субъектов и объектов (между собой и друг на друга), связываемых глобальными компьютерными сетями. Суть этого феномена выражает формула: «*Всё влияет на всё и сразу*».

Объёмы производимой в ходе функционирования социосистем информации, но своевременно не перерабатываемой в целях устойчивости достигли критических уровней. Свидетельство этому — 20-летняя череда мировых кризисов, начавшаяся с кризиса доткомов веб-технологий¹.

Однако фундаментальная суть проблем цифровой трансформации больших систем остаётся вне фокуса пристального внимания науки, которая впервые сталкивается с необходимостью осуществления такой трансформации в глобальных масштабах.

Латентный период «глобальной перенастройки умов» стартовал стихийно в начале 90-х с появлением ГКС и WWW. Стихийно-массовый опыт первого десятилетия рыночной и ментальной адаптации мировой социосистемы к глобальным масштабам цифровой революции завершился глобальным кризисом доткомов. Это был первый отрезвляющий «сигнал» с не восполненными суммарными убытками в несколько триллионов долларов.

¹См. <https://www.moneycrashers.com/dot-com-bubble-burst/>.

Однако первого кризисного предупреждения со стороны ГКС адептам абсолютного рыночного саморегулирования оказалось недостаточно. Стихийный рынок снизил уровни ажиотажных бизнес-ожиданий от доступных веб-технологий и стал постепенно восстанавливать утраченные позиции. Восстановление предкризисного значения биржевого индекса Nasdaq Composite произошло только в 2015 г. (на «реабилитацию» IT-бизнесу понадобилось 15 лет сверхбыстрого развития компьютерной индустрии², создавшей при этом новый высокоприбыльный рынок массовых компьютерных устройств мобильной связи).

Но за этот период ГКС прямо или косвенно напомнила о себе вторым глобальным кризисом в 2007–08 г. На этот раз пострадала мировая финансово-банковская система. Активное использование компьютерно-сетевых технологий ГКС для реализации новейших финансовых алгоритмов «неожиданно» нарушило балансировку и устойчивость самой мощной финансовой системы. «Цена» второго кризиса подскочила на порядок.

Начало 2020 г. обозначило себя дуэтом из пандемии и множеством предвестий «небывалого по масштабам» общемирового кризиса. Оба «нашествия» одновременно и практически «безнаказанно» охватывают все системообразующие сферы мирового рынка.

Анализ нарастающих новейших кризисных проявлений в период с 2000—2020 гг. показывает, что опережающее развитие компьютерной индустрии сопровождается снижением устойчивости мировой экономики и социосистем в целом [22, стр. 82–84]. Поэтому, не смотря на смену многих поколений компьютеров, сетей и бизнес-моделей их использования, на глобальном уровне продолжается воспроизводство парадокса Роберта Солоу³.

Центральная задача данной работы состоит в выявлении причин внутренней несбалансированности ГКС и формировании принципов построения компьютерно-сетевых архитектур, обеспечивающих реинжиниринг ГКС в системно-целостную и универсальную, бесповно программируемую и кибербезопасную среду для построения и цифровой трансформации сколь угодно больших систем, функционирующих в условиях глобальной информационной связности.

²См. анализ причин кризиса доткомов и его последствий в [22, стр.82-84]

³Robert Solow (1987): «You can see the computer age everywhere but in the productivity statistics.» (www.standupeconomist.com/pdf/misc/solow-computer-productivity.pdf). Суть парадокса в том, что 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.

1.2. Эволюция больших систем

К первым поколениям больших систем относятся корпоративные, отраслевые, межотраслевые системы. Их функционал изначально специализирован на решение внутрикорпоративных задач управления. Примерами таких систем являются системы управления атомными станциями, железнодорожным транспортом, непрерывными производствами. Их специфика требует обеспечения максимально возможных уровней безопасности в соответствии с международными и отраслевыми стандартами, обслуживание кадрами высокой квалификации со строгим исполнением технологических нормативов и санкционированного доступа.

Высокие уровни специализации жёстко закреплены в громоздких административных структурах и поддерживающих их компьютерно-сетевых средствах управления. Циркулирующая в таких системах информация полностью закрыта от среды массовых пользователей производимой продукции и услуг. Поэтому большие системы первых поколений относятся к системам *закрытого типа*.

В настоящее время активную и даже доминирующую роль играют социальные, а также социотехнические и экономические сетевые системы массового применения, которые можно отнести к *большим системам второго поколения*. Главное их отличие — обязательное использование ГКС, которая привносит им внутреннее и внешнее свойство глобальной информационной связности.

Большие сетевые системы второго поколения реализуют открытый доступ к информационным/алгоритмическим сервисам массового потребления. При этом они выходят за рамки требований, методов и технологий компьютерно-сетевой реализации, сформированных для «закрытых» корпоративных систем.

Прямое взаимодействие с массовыми потребителями через ГКС в разных системах реализуется, как правило, путём создания быстро растущего количества специализированных цифровых платформ на базе различных, трудно совместимых облачных технологий.

Такие системы для своего выживания и развития требуют непрерывных изменений бизнес-процессов, которые осуществляются путём цифровой трансформации трудно формализуемых антропоцентрических моделей и субъектных функций управления.

Новые формы и способы взаимодействия с массовыми потребителями, которые появляются вместе с развитием информационных технологий, в условиях крайней разнородности ГКС требуют опережающего роста усилий и затрат не только на создание, но и модернизацию

больших систем второго поколения. Причина в том, что модернизация осуществляется посредством раздробленного по многим разнопрофильным платформам инструментария цифровой трансформации. Понятно, что масштабы такой трансформации заведомо ограничены.

Многие системы (более 60% [2]) второго поколения, вынуждены отказываться от консервативного принципа *предварительного проектирования*, характерного для статичных закрытых систем с консервативными структурами управления. Для обеспечения адекватности структур управления потребностям динамической среды массовых потребителей производимых услуг большие системы второго поколения переходят к принципам *непрерывного экспериментирования*, постоянно изменяя бизнес-процессы, технологии производства, поставщиков и потребителей [2].

При этом сетевая среда цифровой трансформации посредством использования большого количества труднсовместимых проблемно-ориентированных технологических платформ с увеличением размеров и масштабов систем требует опережающего роста затрат средств и времени на функциональную интеграцию крайне разнородных сетевых ресурсов ГКС, а также удовлетворение критически растущих требований кибербезопасности.

В условиях отсутствия *единой универсальной* технологической среды цифровой трансформации такие затраты, а также необходимость решения всё более сложных проблем обеспечения кибербезопасности (всё чаще выходящих за рамки сложившихся представлений), становятся принципиальным ограничением, и, по существу, непреодолимым препятствием, на путях дальнейшего наращивания масштабов и развития функционала систем второго поколения.

Реализация и развитие таких систем напрямую зависит от глубины понимания общесистемных свойств и фундаментальных закономерностей развития ГКС. Далеко не все специалисты осознают, что основными причинами ограничения системообразующих возможностей для больших систем второго поколения становятся *внутрисистемные дисбалансы спонтанного развития изначально разнородной ГКС*.

Большие системы второго поколения включают в себя различные классы систем массового использования, такие как Google, Amazon, Alibaba, социальные сети, насыщенные технологиями целевого маркетинга, Яндекс-такси, системы экономики совместного использования, финансовые системы криптовалют и другие.

Эти системы открыты для прямого подключения, но при этом они включают в себя закрытую часть в виде «мозгового центра», как ключевого звена *антропоцентрических моделей* управления.

Персонал этих центров обеспечивает возможность автономной работы таких систем в ГКС в режимах автоматического взаимодействия пользователей с имеющимися информационными и алгоритмическими сервисами, а также, в определённых пределах, проведение модернизации функциональных возможностей систем.

Наличие закрытой части в больших системах второго поколения позволяет отнести их к *не вполне открытым системам*. Они возникли как промежуточный результат эволюционного перехода к *вполне открытым системам* посредством цифровой трансформации субъектных функций персонала мозгового центра в управляющих структурах закрытой части систем.

Не вполне открытые системы предоставляют продвинутые, но всё ещё довольно консервативные в отношении функциональных изменений многофункциональные наборы массовых проблемно-ориентированных алгоритмических сервисов.

Функциональность таких систем априори ограничена рамками проблемной ориентации и фиксируется на стадии проектирования специализированных административных и компьютерно-сетевых структур, закрытых от внешних изменений. Такие системы реализуются в соответствии с проблемно-ориентированными стандартами с использованием различных, трудно совместимых компьютерно-сетевых платформ и технологий.

Отметим важные особенности не вполне открытых систем:

- сетевая реализация в ГКС, которая обеспечивает открытый массовый доступ пользователей к информационным и алгоритмическим сервисам;
- ограниченная расширяемость функциональных возможностей проблемно-ориентированного системного ядра, управление которыми с увеличением масштабов системы требует опережающего роста затрат и усилий от персонала «закрытой» части.

В условиях разнородности ГКС увеличение размеров систем требует прогрессирующего увеличения затрат и времени, как на этапах проектирования, так и на этапах цифровой трансформации. Способность персонала справляться с растущей сложностью и объёмами работ, включая обеспечение кибербезопасности, в рамках существующих технологий быстро достигает пределов субъектных возможностей. Одна из главных причин — природное ограничение пропускной способности человека в части переработки быстро растущих потоков/объёмов слабо формализованной информации.

Это фундаментальное ограничение является причиной роста консерватизма антропоцентрических моделей в целом, в том числе и систем второго поколения, в отношении адаптации к быстрым и масштабным изменениям рыночной конъюнктуры и пользовательских сред. Оно может быть преодолено только цифровой трансформацией интеллектуальных функций антропоцентрических моделей управления, реализуемых «мозговыми центрами», которые требуют глубокой и своевременной переработки непосильных для человека объемов сопутствующей информации. Главным препятствием на этом пути является крайняя разнородность ГКС.

Узаконенная разнородность ГКС является фундаментальной причиной принципиальных ограничений системообразующих возможностей имеющихся в настоящее время технологий дальнейшего роста и развития не вполне открытых систем. Системно-функциональная интеграция сетевых ресурсов ГКС требует решения многовариантных оптимизационных задач, имеющих комбинаторную сложность. В таких задачах для поиска приемлемых решений с увеличением размера систем требуется просмотр полиномиально или экспоненциально растущего количества вариантов решений. В условиях крайней разнородности ГКС просмотр каждого варианта требует немалых затрат средств и времени.

Понятно, что неприемлемый рост комбинаторной сложности является непреодолимым барьером для современных компьютерно-сетевых технологий на путях к *системно-целостной функциональной интеграции совокупных ресурсов ГКС*.

С увеличением масштабов систем другим принципиальным барьером в условиях системотехнической разнородности ГКС становится их уязвимость в связи с невозможностью обеспечения возрастающих требований к кибербезопасности.

Все это вызывает неприемлемый рост консерватизма больших систем второго поколения в отношении возрастающих темпов изменений глобального информационного контекста, в котором они функционируют и должны развиваться. Выявление и устранение корневых причин непрерывного воспроизводства разнородности ГКС становится приоритетной задачей для обеспечения долгосрочных перспектив развития больших систем следующих поколений.

2. Основания глобальной компьютерной среды

В основе ГКС лежат две парадигмы универсальности:

алгоритмическая универсальность компьютеров в модели Дж. фон Неймана;

стек сетевых протоколов TCP/IP, определяющих правила передачи пакетов данных в сетях общего назначения с узлами в виде универсальных компьютеров.

За семь с небольшим десятилетий компьютерной истории модель фон Неймана (первая индустриально значимая модель компьютера) доказала фундаментальную и индустриально-коммерческую жизнеспособность своей универсальности и потому может рассматриваться как классическая модель универсального компьютера. Её уникальные преимущества в том, что она постулирует логически простейшие и, в то же время, практически значимые универсальные правила управления потоком команд автоматического выполнения программ любых алгоритмов во внутренних ресурсах компьютеров. Правила универсальных вычислений данной модели (с небольшими дополнениями в части распараллеливания потока команд) до сих пор составляют логическую основу индустрии массового производства микропроцессоров и компьютеров с микропроцессорными архитектурами.

Важно отметить, что классическая модель не предопределяет математически унифицированных форм представления данных и программ, а также инженерных способов практического воплощения логических правил универсальных вычислений. По этой причине возникают, существуют и растут в количестве компьютерные и программные платформы с различными, изначально несовместимыми между собой архитектурами.

Практически все узлы существующей ГКС представляют собой компьютеры с микропроцессорными архитектурами, представленные растущим множеством различных, трудно совместимых аппаратных и программных платформ. Отсутствие совместимости начинается с самых низовых аппаратных и программных уровней узлов и других компонентов ГКС.

Проблемы функциональной интеграции разнородных ресурсов, как сказано выше, многовариантны и имеют комбинаторную (полиномиальную и выше) сложность. При этом в ходе увеличения размеров и масштабов распределённых систем возникают фундаментальные (над-технологические) проблемы *комбинаторного проклятия размерности*, требующие потенциально неограниченных затрат средств и времени.

Универсальность протоколов TCP/IP позволяет осуществлять передачу информации в сетях, соединяющих компьютеры различных аппаратных и программных платформ. Они обеспечивают расширяемость

и масштабируемость сетей, а также высоконадёжную передачу информации между узлами сети посредством динамической маршрутизации пакетов данных.

По существу, эти протоколы, которые являются основой для ГКС, *легализуют неоднородность сетевых ресурсов*. Таким образом, исходная разнородность ГКС уходит своими корнями в основополагающие принципы *эвристической агрегации* узлов сетей (компьютеров различных платформ) посредством универсальной межплатформенной коммуникации между ними.

Разнородность сетевых ресурсов является основным проявлением и причиной несбалансированного развития ГКС, которое выражается в отсутствии её системной целостности и функциональной полноты. Главным проявлением дисбаланса является то, что ГКС, которая состоит из связанных сетями универсальных компьютеров, ни в целом, ни в любом из своих сетевых подмножеств, изначально не обладает свойством универсальной бесшовной программируемости (функциональной полноты), присущей компьютерам каждого её узла.

Спонтанный, системно несбалансированный рост ГКС сопровождается диспропорциями в глобализации трёх основных видов действий с информацией — *хранения, передачи и преобразования*. Эти фундаментальные виды действий — основа любых информационных процессов. Во внутренних ресурсах компьютеров программы выполняются в соответствии постулатами модели фон Неймана. В ходе исполнения произвольных алгоритмов во внутрикомпьютерных ресурсах они обеспечивают системно-целостное выполнение всех трёх видов действий, обеспечивающих каждому компьютеру свойство функциональной полноты или, что то же самое, свойство бесшовной универсальной программируемости.

В совокупных ресурсах ГКС *глобализованы только два из трёх видов действий — хранения и передачи*, что свидетельствует об отсутствии системной целостности в отношении всех трёх действий. Именно по этой причине ГКС в целом изначально не обладает глобальным свойством *функциональной полноты*.

Одним из проявлений несбалансированного развития ГКС стал экспоненциальный рост потоков и объёмов слабо формализованной глобально распределённой информации, непригодной для глубокой и своевременной алгоритмической переработки в целях управления устойчивым функционированием и развитием больших систем.

Отсутствие глобальной функциональной полноты (бесшовной универсальной программируемости) ГКС становится одной из критических причин *кризиса перепроизводства информации*.

Без глобализации универсально программируемых действий преобразования информации невозможно бесшовное распространение универсальной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров на совокупные ресурсы ГКС.

Легализованная разнородность сетевых ресурсов является фундаментальной причиной внутрисистемных дисбалансов в развитии ГКС, проявляющихся в отсутствии её системной целостности и функциональной полноты.

Несбалансированное развитие делает невозможным кумулятивное использование совокупных ресурсов ГКС в качестве универсальной, бесшовно программируемой компьютерной среды для управления устойчивым развитием сколь угодно больших систем.

Несбалансированное развитие входит в противоречие с кибернетическим принципом Эшби [3], который декларирует необходимое условие для управляющей части систем. Оно состоит в следующем: с увеличением сложности больших распределённых систем, которые являются объектами управления, в ходе их развития (растущий спрос на новые функции) функциональные возможности управляющей части систем должны наращаться, чтобы соответствовать росту функционального разнообразия управляемой части.

То есть, функциональные возможности управления необходимо модернизировать. Для этого используется большой арсенал несовместимых технологий системно-функциональной интеграции сетевых ресурсов изначально разнородных на многих уровнях (аппаратных, программных и информационных).

В данной работе показаны пути корректировки основополагающих (выше сформулированных) принципов организации ГКС, которая позволит устранить коренные причины непрерывного воспроизводства разнородности.

Предлагаемая коррекция посредством математического обобщения модели фон Неймана сделает возможным системно-сбалансированное развитие ГКС, направленное на свободно масштабируемое достижение системной целостности, обеспечивающей бесшовное и кибербезопасное достижение функциональной полноты в любом подмножестве сетевых ресурсов ГКС. Предлагаемое обобщение классической модели сохраняет простоту логических правил в бесшовном распространении свойства универсальной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров на сколь угодно большие множества компьютеров, связанных сетями.

3. Технологии функциональной интеграции разнородных ресурсов в глобальной компьютерной среде

Информационные технологии проникают практически во все сферы повседневной жизни. При этом, как отмечается в [4], их современное развитие в первую очередь обеспечивает получение разрозненных данных, не являющихся систематически организованной информацией, так как данные во многих случаях оторваны от контекста. Поэтому огромное количество данных не может быть своевременно обобщено и преобразовано в полезную для общества информацию, из которой становится возможным получение систематизированных знаний. В общении между людьми и компьютерами, а также компьютеров между собой, не хватает универсальной совместимости того, что передаётся, и того, что исполняется. Это важно для развития ГКС, которая должна наращивать онтологически и семантически осмысленные информационные коммуникации вместо обезличенных.

Индустриальные технологии системно-функциональной интеграции ресурсов ГКС появились во второй половине 90-х годов. Они стартовали с Grid-компьютинга и развивались в парадигме функциональной интеграции распределённых сетевых ресурсов как менее затратная альтернатива дорогим суперкомпьютерным вычислительным системам [5]. Рыночная ниша таких систем оказалась довольно ограниченной и к середине 00-х годов Grid-системы в основном исчерпали свой потенциал наращивания размеров систем и количества пользователей распределённой обработки информации.

Дальнейшее 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. Во второй половине 00-х они составили и до сих пор остаются ведущим индустриальным трендом развития сетевых вычислительных технологий, предоставляющих массовые информационные и алгоритмические услуги.

Облачные технологии применяют при создании цифровых платформ, которые главенствуют на рынке больших систем второго поколения. Цифровая платформа — это технологически поддерживаемая бизнес-модель, которая облегчает обмен данными между двумя или более взаимозависимыми группами участников бизнес-процессов [2]. Платформы обеспечивают прямое соединение производителей информационно-вычислительных сервисов и массовых пользователей

в ходе управления бизнес-процессами. С их помощью обобщается опыт массового вовлечения клиентов, а также предлагаются инновационные формы бизнеса, позволяющие компаниям обмениваться информацией для расширения сотрудничества или внедрения новых продуктов и услуг [2].

Рыночная стоимость цифровой платформы с использованием облачных технологий может достигать \$4,3 трлн [6]. Она включает в себя оплату труда порядка 1,3 млн. сотрудников в основной компании и нескольких миллионов сотрудников в компаниях-партнёрах, обслуживающих и развивающих цифровую платформу.

Централизованные системы имеют принципиальные недостатки клиент-серверных архитектур. Это — сложный и дорогой серверный центр. Концентрируя вычислительные мощности и ресурсы памяти многих серверов, он тянет на себя сетевой трафик, который увеличивается пропорционально количеству и активности пользователей. Пропускная способность каналов связи серверов с глобальной сетью должна при этом обеспечивать доступ потенциально неограниченному числу пользователей.

Чрезмерная сложность центра обработки данных облачных систем и концентрация трафика с увеличением масштабов больших распределённых систем оборачивается не только высокими затратами, но и снижением надёжности обслуживания массовых пользователей (возрастает вероятность глобальных сбоев). Полное отчуждение хранилищ информации и алгоритмических сервисов от личного информационного пространства массовых клиентов является растущей угрозой из-за крупных утечек информации.

В условиях легализованной разнородности ГКС системы второго поколения с ростом своих масштабов становятся все более сложными (рисунок 1) и консервативными. Комбинаторное проклятие размерности проблем интеграции разнородных сетевых ресурсов становится непреодолимым препятствием на путях дальнейшего развития облачных систем.

Масштабы рыночных ниш эффективного использования таких систем уже намного превысили рыночное пространство Grid-систем, однако и они также не безграничны. Пределы роста систем второго поколения на основе облачных архитектур уже вполне осязаемы.

Для частичного преодоления указанных недостатков и развития функциональных возможностей облачных систем в настоящее время

Рисунок 1. Структура пост-облачной четырёхуровневой иерархии <https://ieeexplore.ieee.org/document/8114187>

развивается пост-облачные сетевые архитектуры CDEF [7] с четырёхуровневой иерархией, включающей следующие типы компьютеринга: Cloud- [8], Fog- [9], Edge- [10] и Dew- [11] (рисунок 1).

В таблице 1 приведены характеристики различных типов компьютеринга четырёхуровневой иерархии.

Таблица 1. Характеристики пост-облачных вычислений

Тип компьютинга	Назначение	Модель	Проблемы
Cloud (CC) «облако»	Разнообразные масштабируемые алгоритмические сервисы для массовых пользователей	Централизованная глобально сетевая клиент-серверная	Обеспечение надёжности, безопасности и пропускной способности, сложность технического обслуживания
Fog (FC) «туман»	Обработка данных «на месте» в сетях с мобильными узлами с целью уменьшения количества обращений в центральное облако	Клиент-серверная, встроенная в маршрутизаторы локальных сетей встраиваемых устройств, в том числе беспроводных.	Высокая сложность стандартизации и переносимости ПО в разнородной среде встраиваемых устройств
Edge (EC) «край»	Обработка «мгновенных данных», генерируемых в реальном времени датчиками или пользователями в системах IoT	Вычисления по краям локальных сетей встраиваемых устройств (внутри и вокруг FC)	Высокая сложность стандартизации, программирования и обслуживания, высокая потребительская стоимость
Dew (DC) «роса»	Для ПК, смартфонов и пр. возможность автономной работы с данными. Синхронизация данных с CC при восстановлении доступа в Интернет	Программные модели и средства для подключения к периферийным персональным сетям P2P	Энергоэффективность, хранение данных, живучесть ОС, высокие требования к производительности, а также безопасности баз данных

Ещё одним важнейшим направлением развития не вполне открытых систем являются децентрализованные системы с сетевыми архитектурами принципиально иного типа (противоположного централизованным), а именно — одноранговыми сетями Peer-to-Peer (P2P). В таких системах, которые называют пиринговыми, нет жёсткого разделения вычислительных узлов на серверы (обладающие функциональной полнотой) и клиенты (с изначально усечённым использованием функционала универсальных компьютеров).

В принципе, каждый из узлов P2P сетей в ходе обработки глобально распределённой информации может использоваться всем разнообразием функциональных возможностей универсальных компьютеров и сетевых коммуникационных ресурсов. Благодаря возможностям пропорционального распределения вычислительной нагрузки по узлам и потоков данных по линиям связи в ГКС, открываются пути устранения пиковых перегрузок отдельных фрагментов глобальной сети.

Поскольку P2P-системы могут не иметь специально выделенного серверного центра управления, распределённые системные и пользовательские алгоритмы могут исполняться на неограниченном количестве добровольно подключаемых вычислительных узлов. Они могут включать в себя как пользовательские компьютеры, так и серверные ресурсы ГКС. Децентрализованное выполнение алгоритмов P2P предполагает, что ни один из узлов, участвующих в системе, не обладает монополией на управление всеми ресурсами. Разработчики таких распределённых алгоритмов играют роль «мозгового центра» и держателей закрытого, защищённого от внешних вмешательств системно-функционального ядра.

В отсутствие универсальной вычислительной модели, способной охватить совокупные ресурсы ГКС, использование P2P сетей ограничивается узкопрофильными системами с ограниченной функциональностью, такими как системы обмена файлами, сообщениями и платежами, системы криптовалют, блокчейны и др.

Развитие пиринговых технологий — это путь не только к высокоэффективному использованию совокупных ресурсов ГКС, но и возможность формирования максимально комфортных информационно-алгоритмических сред для пользователей (с высокой устойчивостью процессов обработки и децентрализованным, хорошо защищённым

хранением персональной информации). В таких средах могут достигаться и поддерживаться высокие уровни защиты личного и делового информационного пространства каждого клиента.

На следующих этапах своего развития пиринговые технологии позволят переходить к широкому использованию интеграционных моделей *сетецентрического управления* (СЦУ). Системы СЦУ осуществляют сетевое агрегирование больших распределённых систем из многих систем. В множества агрегируемых систем могут входить системы, осуществляющие как традиционные бизнес-модели, так и платформо-ориентированные.

Всё более разнообразные бизнес-модели на основе различных платформ [12] активно развиваются с применением компьютерно-сетевых информационных технологий. Благодаря синергетике сетевого эффекта цифровизации [12], они обеспечивают прогрессирующий рост эффективности бизнес-процессов, который многократно превосходит рентабельность традиционных бизнес-моделей.

Сетецентрические модели позволяют наращивать масштабы распределённых систем с ещё большим количеством сетевых узлов для решения более крупных и более сложных задач управления и цифровой трансформации.

Впервые целостная концепция сетецентрических систем была сформирована в конце 90-х в применении к задачам военного назначения [13]. Она строилась как новая военная доктрина ведения «сетецентричных войн», в основу которой было положено достигнутое США на мировом рынке безусловное лидерство в ключевых сферах компьютерно-сетевых и информационных технологий.

Концепция строилась с учётом обширного опыта управления остро конкурентным бизнесом, в том числе опыта управления с использованием ресурсов глобального информационного пространства WWW. Она обосновывала возможности трансформации достигнутого цифрового лидерства в безусловное превосходство методов и средств СЦУ военными действиями.

В работе [14] на основе подробного анализа большого количества источников показаны принципиально новые системообразующие возможности больших сетецентрических систем, составленных из многих автономно функционирующих систем, связываемых сетями в единое сетевое информационное пространство управления военными действиями.

Показаны преимущества СЦУ, которое в едином информационном пространстве в условиях быстро меняющейся обстановки обеспечивает кардинальное повышение качества управления совместным функционированием больших количеств многовидовых автономных систем, нацеливаемых на решение крупномасштабных военных задач.

Преимущества СЦУ в едином сетевом информационном пространстве ведения военных действий достигаются посредством осуществления в реальном времени:

- полноты и оперативности сбора информации (внешней — из окружающей среды, внутренней — от исполняющих систем);
- накопления информации, определяющей совокупное текущее состояние распределённых систем;
- совместной переработки поступающей и накапливаемой информации, которая обеспечивает формирование и распределение потоков субсидиарной⁴, высоко согласованной управляющей информации, предназначенной для исполнительных систем различного назначения;
- своевременной доставки субсидиарной управляющей информации ко всем задействованным исполнительным системам.

Теоретические наработки создания систем СЦУ, а также накопленный опыт их воплощения [14, 15] имеют все основания для «конверсионного» трансфера в гражданские сферы развития цифровой экономики.

В основу национального проекта РФ «Цифровая экономика» положен многоплатформенный подход. Быстро растущая динамика развития и количественного роста бизнес-моделей на основе различных цифровых платформ и соответствующих экосистем [12] становится одним из главных трендов в развитии этого проекта.

В связи с количественным ростом платформо-ориентированных бизнес-моделей различного назначения в осязаемой перспективе возникнет необходимость формирования единого рыночного пространства цифровой экономики. При этом становится актуальной проблематика сетцентрической агрегации ресурсов ГКС, в которых

⁴Субсидиарное управление возникает в системах из многих исполнительных подсистем различного назначения. Каждая из подсистем может обладать разным функционалом и своей степенью автономности, поэтому должна получать свой пакет управляющих команд, определяющий или корректирующий исполнение текущих заданий.

реализуются такие платформы, включая соответствующие ресурсы коммуникационных и производственных процессов, протекающих в их экосистемах.

На рисунке 2 приведён пример сетевидной структуры субсидиарного распределённого управления в организационных системах [16]. В этой структуре осуществляется делегирование части функций управления из главного центра управления (ГЦУ) в распределённые центры управления (РЦУ). ГЦУ остаётся системно-функциональным ядром сетевидной системы управления. Между объектами управления и ГЦУ находятся РЦУ, контур управления которых может быть замкнут в кольцо.

Рисунок 2. Структура субсидиарного распределённого управления [16]

Уровней управления может быть много — от 1 до n . Концентрические уровни обмениваются нисходящими и восходящими гармонизирующими потоками $ГП_1, \dots, ГП_n$. Разнородность системы управления проявляется на аппаратно-программных уровнях компьютерной среды, а также на функциональном уровне — в различии полномочий, содержании управления. Элементы нижнего уровня также связаны, как и элементы верхних уровней, что позволяет осуществлять структурную перестройку систем управления.

Для пользователя такие системы управления удобны, но их техническая реализация в ресурсах разнородных сетей намного сложнее, чем построение иерархических систем управления на основе облачных и пост-облачных технологий.

Однако главным препятствием на пути развития пиринговых сетей также как и «клиент-серверных» сетевых архитектур, остаётся многоуровневая разнородность ГКС. *Для вовлечения в открытые сетевые системы неограниченного количества универсальных вычислительных узлов и обеспечения свойств системно-целостной универсальности с бесшовной программируемостью всей совокупности задействованных узлов необходима модель универсально-программируемых распределённых вычислений в сколь угодно больших пиринговых сетях.*

Массовое практическое воплощение новой модели распределённых вычислений станет возможным на основе нового класса массовых универсальных однокристалльных компьютеров, архитектура которых обеспечивает эффективное аппаратное воплощение этой модели в сколь угодно больших сетях (см. далее).

Отметим общие недостатки, присущие технологиям создания и эксплуатации систем второго поколения. Сегодня вычислительные и сетевые архитектуры и технологии обработки глобально распределённой информации направлены на «лобовое» преодоление растущей комбинаторной сложности системно-функциональной интеграции разнородных сетевых ресурсов. При этом не вполне открытые системы в своём проблемно-ориентированном росте увеличивают разнородность сразу на многих системных уровнях ГКС. Это приводит к неконтролируемому увеличению внутрисистемной сложности ГКС, и как следствие, к чрезмерным затратам на разработку, программирование, эксплуатацию, сопровождение и модернизацию, а также, что критически важно, к утрате контроля над кибербезопасностью больших систем.

Основной применяемый метод снижения комбинаторного сопротивления посредством стандартизации технологий не успевает за быстрым и хаотичным расширением разнородной компьютерной среды⁵. Прогрессирующий в условиях разнородности сетевых ресурсов рост сложности больших систем делает невозможным создание и развитие всеохватывающих стандартов системно-функциональной интеграции. Всё более острыми становятся проблемы обеспечения кибербезопасности. Растущее количество глобальных отказов не вполне открытых систем и примеров их уязвимости свидетельствует об исчерпании в среднесрочной перспективе стратегических возможностей известных технологий функциональной интеграции разнородных ресурсов ГКС.

⁵Это нашло подтверждение в причинах досрочного завершения первого и самого масштабного «сетевидного» проекта «Future Combat System» (FCS) [15].

4. К универсальному и кибербезопасному алгоритмическому пространству цифровой трансформации

Существующую ГКС можно рассматривать как стартовую технологическую площадку с быстрорастущим функциональным и вычислительным потенциалом обработки глобально распределённой информации для формирования в ней универсальной кибернетической среды сетецентрического управления сколь угодно большими социальными, киберфизическими, киберэкономическими и другими системами.

Принцип Эшби [3] определяет условие балансировки функциональных возможностей управляющей и управляемой частей систем с управлением. Применительно к ГКС он требует возможностей практически неограниченного наращивания алгоритмического функционала, посредством оперативно программируемой переработки глобально распределённой информации в целях управления всем многообразием сколь угодно больших систем. Этот рост требует *от ГКС в целом* свойства функциональной полноты, т.е. универсальной и, притом, бесшовной программируемости.

Как сказано выше, разнородность сетевых ресурсов не позволяет ГКС в целом достигать глобального свойства функциональной полноты, которым локально обладает каждый из её узлов. Поэтому системно несбалансированное развитие ГКС вступает в конфликт с принципом Эшби. В условиях легализованной разнородности сетевых ресурсов результатом этого конфликта является невозможность преодоления комбинаторно-сложных барьеров на путях реализации бесшовной универсальной программируемости любых подмножеств узлов ГКС, используемых в больших системах.

Отсутствие единой универсальной модели бесшовно программируемых распределённых вычислений в ГКС приводит к необходимости реализации больших распределённых систем с использованием широкого спектра проблемно-ориентированных, весьма трудных в применениях технологий интеграции крайне разнородных сетевых ресурсов.

Работа [17] представляет одно из многих направлений развития программных технологий функциональной интеграции разнородных сетевых ресурсов. В ней обозначены ключевые проблемы таких программных технологий с сетецентрическими архитектурами. Это — стандартизация, масштабируемость, композиция по требованию, безопасность и др.

Указанные проблемы в таких технологиях решаются с использованием эвристических и согласительных подходов стандартизации. Они

порождают всё большее количество системно не увязанных между собой и конкурирующих программно-технологических платформ интеграции сетевых ресурсов. Требуют обязательных априорных ограничений функционала систем, что ориентирует их на создание узкопрофильных систем и подсистем. Все они решают во многом одни и те же проблемы, но по-разному — с заведомыми ограничениями на размеры систем, связанные с преодолением комбинаторной сложности проблем интеграции.

Очевидно, что изначально несовместимые между собой многоплатформенные подходы имеют заведомо ограниченный системообразующий потенциал, замыкаемый в своих многочисленных изолированных экосистемах. В условиях глобальной сильносвязности растущее «лоскутное одеяло» из разных экосистем не может обеспечить долгосрочных перспектив развития мировой социосистемы.

Далее на основе предлагаемой универсальной модели распределённых вычислений покажем направления движения по пути устранения многоуровневой разнородности ГКС с последующим формированием в существующих ресурсах ГКС универсального, бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства, которое станет основой для создания и развития единой универсальной сетевцентрической платформы цифровой трансформации всего разнообразия больших систем.

4.1. Побочные эффекты классической модели универсального компьютера как истоки разнородности

Как было сказано, изначальная разнородность ГКС логически проистекает из постулатов классической модели универсальных компьютеров. Постулаты индустриально закреплёны в микропроцессорах и массовых компьютерах с микропроцессорными архитектурами, миллиарды которых тиражируют многоуровневую разнородность в ресурсах ГКС.

Отметим и проанализируем побочные эффекты, сопутствующие классической модели универсального компьютера:

- инженерам предоставлена возможность на эвристическом уровне создавать изначально несовместимые компьютерные платформы;
- программистам — произвольно, по большей части эвристически, формировать разнообразные структуры данных и по собственному усмотрению алгоритмически кодировать их в потоках адресов к памяти.

Именно эти побочные эффекты, являясь результатом изначально-го отсутствия математической регламентации форм представления данных и программ, а также способов осуществления универсально программируемых вычислений, служат истоками непрерывного воспроизводства разнородности ГКС. Отсутствие такой регламентации оставило в классической модели неконтролируемые постулированной логикой универсальных вычислений степени свободы, которые остались открытыми для субъектных эвристических импровизаций инженеров и программистов.

На первоначальных этапах компьютеризации, вплоть до появления ГКС, это не имело отрицательных последствий. Наоборот, свобода проявления изобретательности инженеров и программистов максимально способствовала наращиванию масштабов и темпов компьютеризации.

Однако три десятилетия стихийного, системно несбалансированного роста разнородных сетей привели к неконтролируемому феномену глобальной информационной сильносвязности и кризису перепроизводства информации. Это неуклонно и с нарастающей мощностью требует кардинального обновления социально-экономических приоритетов, принципов и моделей устойчивого развития социосистем. Для такого обновления необходима принципиальная коррекция базовых принципов, лежащих в основе ГКС.

В рамках действующих по настоящее время оснований ГКС фрагментированный по разным платформам интеллектуальный ресурс эвристического потенциала инженеров и программистов уже не в состоянии обеспечивать управляемое и кибербезопасное развитие ГКС и, соответственно, социосистем, охватываемых глобальными сетями со слабо контролируемым функционалом, всё более уязвимыми и «шумящими» потоками разрозненной информации.

Размеры и сферы влияния ГКС превысили критические уровни безопасного роста. На смену эвристическим основаниям ГКС, исчерпавшим свой системообразующий потенциал стихийного роста, должны прийти математические, которые должны стать основой системно-сбалансированного, контролируемого и безопасного развития ГКС и социальной среды, на которую она оказывает беспрецедентное влияние.

4.2. Универсальная модель распределённых вычислений в совокупных ресурсах глобальной компьютерной среды

В данной работе представлена универсальная модель бесшовно программируемых распределённых вычислений в сколь угодно больших

одноранговых (P2P) компьютерных сетях. Она построена [18] путём «поглощающего» математического обобщения модели Дж. фон Неймана — классической модели универсального компьютера — на основе компьютерного базиса исчисления древовидных структур (ИДС).

Формализм ИДС посредством деревьев с любым количеством задаваемых вершин (рисунок 3) позволяет осуществить математическую унификацию структурных форм представления компьютерной информации (данных и программ), а также методов бесшовного программирования/выполнения программ (в процедурном стиле фоннеймановской модели) как во внутренних ресурсах компьютеров, так и в сколь угодно больших компьютерных сетях [18].

Рисунок 3. Древовидная структура и компьютерная форма её представления [18]

На рисунке 3 показан переход от математической формы представления деревьев рисунка 3а, здесь «многоарные» связи между вершинами обозначены пунктирными отрезками) к бинарной форме компьютерного представления (рисунок 3б). Переход производится посредством удаления всех пунктирных связей между вершинами и добавление вместо них связей, обозначенных сплошными отрезками. Это взаимно-однозначный переход.

Значениями вершин таких деревьев (на рисунке 3 обозначены буквами) могут быть слова допустимых типов данных (в виде битовых строк разной длины), а также однородные массивы однотипных (равной длины) слов. Значения строк могут интерпретироваться согласно

списку допустимых типов данных как символьные или числовые слова или массивы, а также как двоичные коды программ, предназначенных для запуска в различных указываемых программистом компьютерах и ОС. Количества вершин и размеры двоичных строк и массивов принципиально не ограничены.

Исходный постулат модели ИДС формулируется следующим образом: универсальной формой представления компьютерной информации (данных и программ) являются древовидные структуры в виде компьютерной формы представления двоичных деревьев (рисунок 3б).

Формализм ИДС представляет собой математически замкнутый компьютерный базис операций формирования и преобразования произвольных древовидных структур [18] в виде двоичных деревьев (рисунок 3б). По сути, компьютерный базис ИДС можно рассматривать как фундаментальный математический стандарт представления и обработки компьютерной информации.

Фундаментальность выбранной формы представления компьютерной информации (данных и программ) состоит в характеристическом свойстве минимальной структурной сложности деревьев: связность между всеми вершинами обеспечивается минимально возможным количеством дуг (количество дуг на 1 меньше количества связываемых вершин). Потеря любой из дуг нарушает целостность дерева.

Достоинства модели ИДС:

- являясь минимально достаточным (для сохранения универсальности) математическим обобщением классической модели универсального компьютера, она в полной мере наследует процедурный стиль программирования и, соответственно, простейшую логику управления исполнением программ;
- открывает пути к конструктивной математически замкнутой унификации (стандартизации) форм представления и способов обработки компьютерной информации, что ведёт к устранению причин непрерывного воспроизводства разнородных форм представления данных и программ, а также компьютерных и программных платформ;
- открывает возможности формирования в совокупных ресурсах существующей ГКС математически однородного, бесшовно программируемого алгоритмического пространства распределённых вычислений и сетецентрического управления, которое обнуляет многоуровневые комбинаторные компоненты сложности функциональной интеграции ресурсов ГКС.

На основе компьютерного базиса ИДС построен универсальный процедурный язык программирования, в котором данные и программы представлены двоичными деревьями [19].

4.3. К универсальным сетевым компьютерам с немикропроцессорной архитектурой

Новая модель ИДС в результате «поглощающего» математического обобщения классической модели вводит математически замкнутую унификацию форм представления компьютерной информации и способов её обработки. При этом она наследует универсальность, простоту и высокую эффективность аппаратного воплощения классических правил управления универсальными вычислениями. Не предполагает обесценивания колоссального запаса прежних компьютерных и программных наработок, поскольку мягкая «реформация» классической модели позволяет осуществить эволюционный переход от классической модели, воплощённой в массовых компьютерах с микропроцессорными архитектурами, к новой модели на основе ИДС. Это позволит в полной мере использовать отработанные за десятилетия индустриальные и рыночные методы и каналы смены поколений компьютеров и программ, но уже на основе обновлённых принципов.

В рамках новой модели на основе компьютерного базиса, воплощающего универсальный математически замкнутый формализм ИДС, становится возможным:

- математически замкнутая унификация форм представления компьютерной информации (данных и программ) и способов работы с ней, которая обеспечивает устранение логических причин (скрытых в постулатах классической модели универсальных компьютеров) непрерывного воспроизводства разнородности аппаратно-программных платформ и компьютерной информации, циркулирующей в ГКС;
- аппаратная реализация базиса ИДС в однокристалльных сетевых компьютерах с новой — немикропроцессорной — архитектурой, которая обеспечивает:
 - эффективное аппаратное решение по управлению универсально программируемыми вычислениями во внутрикомпьютерных ресурсах и обеспечению их кибербезопасности (защиты процессов исполнения программ от несанкционированного доступа со стороны других программ);
 - системно-целостное (бесшовное) распространение свойств универсальной программируемости и кибербезопасности

с внутрикомпьютерных ресурсов компьютеров на ресурсы сколь угодно больших совокупностей таких же компьютеров (с немикропроцессорной архитектурой), связанных сетями.

Предлагаемое обобщение классической модели открывает возможности построения *нового класса универсальных компьютеров*, отличающихся *немикропроцессорной архитектурой*, которые на аппаратном уровне закрепляют возможности математически замкнутой модели ИДС по распространению свойства бесшовной программируемости и кибербезопасности на сколь угодно большие сети. Будем говорить, что они обладают *принципиально новым свойством универсальности*, которая бесшовно распространяется с внутрикомпьютерных ресурсов на любое множество таких компьютеров, связанных сетями.

Принципы построения однокристальных сетевых универсальных компьютеров с немикропроцессорной архитектурой предложены и развиваются в [18, 20–22].

Система команд компьютеров с немикропроцессорной архитектурой реализует математически замкнутый компьютерный базис в виде ИДС [18].

Рассмотрим переход от компьютеров с микропроцессорными архитектурами к компьютерам сетевой интеграции с немикропроцессорной архитектурой (рисунок 4), воплощающей модель вычислений на основе ИДС.

Рисунок 4. Переход от микропроцессорной к немикропроцессорной архитектуре

Из четырёх блоков (рисунок 4а) фон-неймановских универсальных компьютеров АЛУ (арифметико-логическое устройство), ОЗУ (оперативное запоминающее устройство), УУ (устройство управления) и В/В (устройство ввода-вывода) микропроцессоры в одном кристалле СБИС реализуют только два из них — АЛУ и УУ. Память (ОЗУ) и устройства В/В вынесены из кристалла микропроцессора на системную плату как отдельные блоки, управление которыми осуществляет УУ из микропроцессора.

В классической модели ОЗУ представляет собой набор пронумерованных двоичных слов одинакового размера с линейно организованным адресным пространством (адрес взаимно-однозначно связан с номером слова). В каждый такт времени классическое ОЗУ может выполнить только логически примитивное действие либо чтения, либо записи значения слова по указанному в команде доступа к памяти адресу. Тем самым такой оперативной памяти, не обладающей собственным автономным интеллектом управления, отводится роль пассивного хранилища программ и данных. Ресурсы АЛУ и В/В, также как и ОЗУ, в данной модели не имеют самостоятельного автономного интеллекта управления.

В классической модели реализована звездообразная логическая схема централизованного управления «ведущий-ведомые». *Алгоритмический интеллект управления* ведущего концентрируется в УУ, остальные три вида ведомых ресурсов выполняют свои действия при получении команд из центра управления. Ведомые ресурсы могут вырабатывать коды прерывания, которые учитывает алгоритмический интеллект УУ.

Аппаратно воплощаемая в УУ логика алгоритмического интеллекта реализует простейшие практически значимые классические правила процедурного управления взаимодействием всех четырёх видов внутренних ресурсов классической модели, обеспечивающие исполнение универсально программируемых алгоритмов. Эти правила реализуются в виде рабочего цикла управления потоком команд. В упрощённом варианте цикл поочерёдно осуществляет следующие действия:

- (1) адресная выборка очередной команды и её операндов из ОЗУ,
- (2) исполнение указанной операции в АЛУ,
- (3) занесение, если требуется, результата в ОЗУ,
- (4) безусловный или обусловленный переход к следующей команде.

Будем считать, что этот управляющий цикл является «движком» *алгоритмического интеллекта* классической модели универсальных компьютеров.

Необходимо отметить, что аппаратно реализуемый алгоритмический интеллект классической модели предполагает *однозадачный режим строго поочерёдного исполнения разных алгоритмов*, в котором не возникает конкуренция многих программных процессов за совместно используемые ресурсы.

Кардинальное улучшение потребительских свойств универсальных компьютеров в их изначально однозадачной модели стало возможным благодаря *программной реализации системных функций динамического управления процессами и ресурсами*, включая многозадачный режим, который обеспечивал совместное выполнение процессов многих программ, размещаемых в памяти. Растущее разнообразие программ, реализующих системные функции, объединённых в большие программные комплексы, получило название операционных систем (ОС).

Программная реализация функций ОС, опираясь на аппаратно реализуемый в УУ алгоритмический интеллект с компактным набором базисных действий управления исполнением произвольных алгоритмов, открыла возможности наращивания *системного интеллекта* универсальных компьютеров, направленного на практически неограниченное расширение их потребительских свойств.

Однако программное воплощение системного интеллекта имеет принципиальные ограничения в своём развитии. Растущие с опережением сложность и количество системных программ в рамках ОС требуют от компьютерных архитектур догоняющего наращивания производительности и обеспечения растущих требований к кибербезопасности.

Доминирующие до настоящего времени микропроцессорные архитектуры в составе ГКС практически исчерпали свой системообразующий потенциал догоняющего развития в обоих указанных направлениях. Прекращение действия закона Мура лишает компьютерную индустрию возможностей выжимать из микропроцессорных архитектур остатки системообразующего потенциала.

В микропроцессорных архитектурах (рисунок 4а) программная реализация системного интеллекта компьютеров осуществляется посредством чрезмерно сложных и громоздких, медлительных и всё более уязвимых ОС.

Микропроцессоры не обладают достаточным объёмом собственной системной памяти для хранения текущего состояния всех вычислительных процессов и ресурсов, поэтому для хранения системных программ и таблиц текущего состояния используется ОЗУ, расположенное вне микропроцессора. В ОЗУ системные программы ОС вступает

в ресурсную и временную конкуренцию с прикладными программами, отнимая у них до половины и более времени и адресного пространства памяти, постоянно создавая при этом практически неустранимые на программном уровне угрозы кибербезопасности.

Серьёзные проблемы возникают и для адаптации ОС к использованию в системах реального времени, при которой существенным образом возрастает специализация их функционала и ограничиваются возможности переноса ОС на различные аппаратные платформы.

В ходе программного исполнения системных функций в микропроцессоре доступ к системным программам и данным, расположенным в ОЗУ, производится посредством больших объёмов системных команд, направляемых в УУ, размещённом отдельно от ОЗУ. Между ОЗУ и микропроцессором при этом происходит многошаговый обмен системной информацией, который осуществляется в режиме последовательного доступа к словам, расположенным в ОЗУ (рисунок 4а). При этом возникает замедляющий эффект «узкого горла» памяти.

Необходимость перемещения больших потоков системных команд и данных ОС через «узкое горло» для их исполнения вне ОЗУ становится причиной не только больших временных затрат, но и недостаточной для растущих требований к кибербезопасности защиты различных выделяемых областей памяти от несанкционированного вмешательства со стороны других программ.

Наличие «узкого горла» является принципиальным недостатком микропроцессорных архитектур и свидетельствует об их принципиальной несбалансированности, которая препятствует дальнейшему прогрессу их характеристик. Эта проблема обостряется разрывом между быстродействием микропроцессорных кристаллов и быстродействием кристаллов памяти.

В принципе, возможны два подхода балансировки быстрых процессов арифметико-логической обработки данных и более медленных темпов доступа к ОЗУ.

Первый подход применяется в компьютерах с микропроцессорными архитектурами. Он реализуется путём наращивания встроенной в микропроцессоры многоуровневой кэш-памяти. В определённых случаях кэш-память позволяет заметно сокращать количество повторного чтения/записи команд/данных, размещаемых в ОЗУ (за счёт их промежуточного хранения во внутренней кэш-памяти микропроцессора и многократной обработки в АЛУ с высокой тактовой частотой).

Размещение УУ и АЛУ на одном кристалле микропроцессоров, а также массовое использование ОЗУ, изначально имеющего «узкое горло», в примитивном режиме адресуемого чтения/записи слов позволяет характеризовать микропроцессорные архитектуры компьютеров как («умная» арифметика) & («глупая» память).

В такой компоновке аппаратная часть реализации «ведущего» алгоритмического интеллекта УУ по факту соседствует в одном кристалле с «ведомым» (т.е. «глупым») блоком АЛУ, схемотехника которого реализует только фиксированный, ограниченно-замкнутый набор арифметико-логических и служебных операций.

В этой ситуации характеристика («умная» арифметика) & («глупая» память) является маркером системного дисбаланса взаимодействия алгоритмического и системного интеллектов микропроцессорных архитектур.

Второй подход — изменение в структуре управления статуса оперативной памяти с «ведомый» на «ведущий». Это достигается путём привнесения в кристалл ОЗУ аппаратных средств автономного выполнения базисного набора системных функций управления процессами и ресурсами. Такие функции требуют больших объёмов системной памяти для хранения текущего состояния процессов управления, составляющих основу системного интеллекта. Эта системная память и сами функции аппаратно реализуются в кристалле ОЗУ. Аппаратная локализация системных функций внутри ОЗУ позволяет существенно ускорить (за счёт устранения «узкого горла») и повысить защищённость их исполнения.

Проблема «узкого горла» оперативной памяти решается принципиальным расширением системных функций УУ аппаратно реализуемым системным интеллектом, инкапсулированным в алгоритмы исполнения операции ИДС, а также перемещением УУ во внутреннее пространство СБИС ОЗУ (рисунок 4б). Вместе с этим УУ в своём новом функционале и расположении берёт на себя функции управления интерфейсами В/В (рисунок 4б).

В рассматриваемой немикропроцессорной архитектуре с опорой на модель ИДС реализуется второй подход.

Математическая замкнутость и полнота компьютерного базиса ИДС позволяет относительно просто переходить к системно сбалансированной немикропроцессорной архитектуре компьютеров (рисунок 4б). Возможности прозрачной и эффективной аппаратной реализации

системного интеллекта компьютеров с немикропроцессорной архитектурой предопределяются математической замкнутостью модели распределённых вычислений на основе ИДС.

В новой архитектуре системные команды, запускающие аппаратное исполнение системных функций управления процессами и ресурсами, изначально инкапсулированы в алгоритмы исполнения небольшого, но универсального математически замкнутого набора операций преобразования древовидных структур нового компьютерного базиса ИДС [18]. При этом вызовы системных команд локализуются в скрытых от программистов алгоритмах воплощения операций преобразования деревьев. Тем самым программисты избавляются от массовой необходимости прямого обращения к системным командам управления вычислительными процессами/ресурсами. При этом аппаратно реализуемые в УУ, размещаемого в кристалле ОЗУ, системные функции, запускаются автоматически в ходе исполнения математических операций обработки деревьев представленных в компьютерном базисе ИДС. Эти математические операции используются программистами, решающими задачи в разных предметных областях.

Обретая в новой архитектуре встроенный, аппаратно реализуемый системный интеллект и статус «ведущий», оперативная память становится «умной».

За счёт аппаратной реализации в «умной» памяти системных функций управления ресурсами/процессами обеспечивается кардинальное повышение скорости их выполнения, а также кибербезопасности (за счёт аппаратной защиты от несанкционированного воздействия программных процессов друг на друга).

Характерное отличие компоновки компьютеров с немикропроцессорной архитектурой — размещение УУ, ОЗУ и интерфейсов В/В на одном кристалле СБИС (рисунок 4б). Такую компоновку можно характеризовать как («умная память» & «глупая арифметика»). Она обеспечивает сбалансированное взаимодействие всех четырёх блоков универсального компьютера.

В принципиально новом статусе «ведущего» центра управления «умная» память новых компьютеров обеспечит автономное исполнение программ с выполнением следующих видов системных функций управления:

- собственными ресурсами оперативной памяти (динамическое распределение, многозадачность и др.);

- процессами ввода/вывода во взаимодействиях с локальными периферийными устройствами и отдалёнными сетевыми компьютерами;
- взаимодействиями с «ведомыми» устройствами — сопроцессорными, реализующими сложные арифметико-логические операции, и/или сателлитными, осуществляющими автономное исполнение различных специализированных и программируемых вычислительных функций.

В немикропроцессорной архитектуре наиболее сложные и ресурсоёмкие функции АЛУ имеют системный статус «ведомые». Они, благодаря резидентному размещению УУ в ОЗУ, «выносятся за скобки» нового центра управления и используются в качестве сопроцессорных или сателлитных вычислительных ресурсов. К таким «ведомым» ресурсам относится весь спектр существующих и перспективных вычислительных устройств — от универсальных компьютеров с микропроцессорными архитектурам и высокопараллельных ускорителей (NVIDIA, AMD и др., в том числе ПС-2000М [23]) до специализированных вычислителей, включая криптографические процессоры, видео-ускорители, нейрокомпьютерные, а также оптические и квантовые вычислительные устройства и др.

Такая компоновка позволит в полной мере обеспечивать преемственность с наработанным и совместимость с нарабатываемым в ГКС вычислительным/функциональным потенциалом.

Отметим принципиальное функциональное отличие «умной памяти». В составе немикропроцессорной архитектуры оперативная память перестаёт выглядеть для программиста физическим устройством хранения значений своих слов с примитивным функционалом доступа к словам по указываемым адресам. В новых компьютерах *оперативная память обретает свойства абстрактной памяти хранения и преобразования двоичных деревьев*. Такое абстрагирование обеспечивает математическую унификацию глобально-распределённой компьютерной информации и способов работы с ней и, как следствие, принципиальное снижение субъектных интеллектуальных затрат и времени на создание и развитие больших распределённых систем, функционирующих в ГКС в условиях глобальной информационной связности.

Новые компьютеры в своей немикропроцессорной архитектуре фиксируют математическую унификацию форм представления и способов переработки глобально распределённой компьютерной информации в виде древовидных структур и создают математическую основу для

беспроводного программирования и выполнения в совокупных ресурсах ГКС любых алгоритмов их преобразования.

4.4. Особенности беспроводной интеграции сетевых ресурсов и формирования в ГКС универсального алгоритмического пространства цифровой трансформации

Предлагаемый класс компьютеров с немикропроцессорной архитектурой *с принципиально новым свойством беспроводной глобально распределённой универсальности* представляет собой системотехническую основу для формирования в ресурсах существующей ГКС универсального математически однородного алгоритмического пространства цифровой трансформации.

Сетевые компьютеры с немикропроцессорной архитектурой, представленные выше, являются тем универсальным системообразующим элементом, который открывает пути к системно-сбалансированной глобализации всех трёх фундаментальных видов действий с информацией — хранения, передачи и преобразования.

Включение новых компьютеров в узлы ГКС позволит в сетевой архитектуре P2P практически без дополнительных затрат беспроводно распространять свойство универсальной программируемости на все узлы, которые подключаются к глобальной сети через такие же сетевые компьютеры.

Такие компьютеры, расположенные в узлах сетей, позволят замкнуть большую часть стремительного роста трафика распределённых вычислений в ГКС на себя. Их назначение — аппаратно-системная поддержка беспроводной интеграции сетевых ресурсов для осуществления распределённых/параллельных вычислений в ресурсах таких же компьютеров других узлов [22].

Системно-целостная трансформация ГКС в пиринговый универсально программируемый глобально распределённый компьютерный агрегат с неограниченно растущим параллелизмом открывает возможности формирования в совокупных ресурсах существующей ГКС *универсального, математически однородного, беспроводно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых и параллельных вычислений* [22], которое составит основу единой и универсальной платформы цифровой трансформации.

В этом пространстве предлагаемые компьютеры позволят обнулить сложность проблем создания в ГКС и развития сколь угодно больших информационно-управляющих систем. В настоящее время

эти проблемы связаны с неприемлемым ростом затрат на лобовое преодоление комбинаторного проклятия размерности в решении задач системно-функциональной интеграции крайне разнородных ресурсов ГКС.

Благодаря аппаратно-автономному осуществлению процессов выполнения системных функций в УУ, размещаемому *внутри кристаллов оперативной памяти*, сетевые компьютеры с немикропроцессорной архитектурой, реализующие в своей системе команд компьютерный базис ИДС, открывают следующие возможности:

- аппаратно-системного закрепления в ГКС математически унифицированных форм представления данных и программ и способов работы с ними;
- кардинального повышения системного интеллекта УУ, на который возлагается выполнение ключевых и наиболее «тяжёлых» системных функций управления как локальными, так и распределёнными процессами и ресурсами;
- ускорения системных функций на несколько порядков, по сравнению с их программной реализацией в ОС на компьютерах с микропроцессорными архитектурами;
- распространение свойства бесшовной программируемости с внутренних ресурсов компьютеров в узлах сетей на совокупные ресурсы ГКС;
- кардинальное повышение надёжности и кибербезопасности без применения дополнительных аппаратных и программных решений.

В составе универсальных компьютерных узлов ГКС компьютеры с немикропроцессорной архитектурой способны взять на себя функции децентрализованного управления высокопараллельными распределёнными вычислениями в сколь угодно больших пиринговых сетях. За счёт нейтрализации фактора разнородности сетевых ресурсов эти компьютеры могут обеспечить:

- системно сбалансированное развитие ГКС в согласии с принципом Эшби (за счёт функционально полного распространения в математически однородном алгоритмическом пространстве свойства бесшовной программируемости на сколь угодно большие сети в едином математическом формализме ИДС);
- кардинальное повышение кибербезопасности при реализации распределённых вычислений и сетевых процессов управления (за счёт высокоавтономной аппаратной реализации системных функций управления внутрикомпьютерными вычислительными ресурсами и межкомпьютерными взаимодействиями);

- совместную работу с существующими компьютерными и программными платформами (в режимах аддитивного использования различных компьютерных платформ и наработанного для них системного и прикладного программного обеспечения).

Универсальное, математически однородное алгоритмическое пространство цифровой трансформации, нивелируя фактор разнородности, вместо комбинаторно сложной проблемно-ориентированной интеграции сетевых ресурсов обеспечит возможность функционально полного бесшовного программирования любых пиринговых алгоритмов децентрализованной, высокопараллельной переработки глобально распределённой структурированной информации в едином математическом формализме ИДС.

Бесшовное программирование в формализме ИДС не отличается повышенной сложностью и доступно практически любому практикующему программисту.

Универсальный язык программирования [19], воплощаемый в системе команд новых компьютеров, позволяет в едином математическом формализме ИДС программировать любые алгоритмы обработки информации, представленной в виде произвольных древовидных структур. Такие структуры могут располагаться не только во внутренней памяти новых компьютеров. Связанные между собой фрагменты древовидных структур, помещённые в память таких компьютеров, соединённых сетями, автоматически и в полной мере сохраняют свои структуры связей между вершинами деревьев, размещёнными в распределённой памяти, принадлежащей сетевым компьютерам разных узлов ГКС. *В рамках модели ИДС программы обработки таких данных инвариантны относительно размещения фрагментов деревьев в распределённой памяти компьютеров с немикропроцессорной архитектурой, связанных сетями.*

Таким образом, в математическом однородном алгоритмическом пространстве на основе ИДС становится возможной реализация бесшовно программируемой и высокопараллельной (в пропорции к количеству фрагментов деревьев размещаемых в памяти разных сетевых компьютеров) обработки глобально распределённой информации с вовлечением в ходе программирования и исполнения алгоритмов любого требуемого количества узлов ГКС.

В каждом узле новые компьютеры в ходе выполнения своих программ обработки глобально распределённой информации при необходимости могут в аддитивных режимах взаимодействовать со

всеми локальными ресурсами своих узлов. Для этого компьютеры с немикропроцессорной архитектурой, осуществляющие универсально программируемые системные функции сетевой интеграции, должны иметь в узлах ГКС системный статус «ведущий». Остальным компьютерным ресурсам в составе сетевых узлов придаётся статус «ведомые». Тем самым открываются перспективы вовлечения в новое беспроводное пространство распределённых вычислений всех накапливаемых в ГКС вычислительных, программных и информационных ресурсов, которым придаётся статус «ведомых».

Осуществляя диспетчеризацию работы локализованных в узлах ресурсов, новые сетевые компьютеры выполняют функции интеллектуального моста, через который осуществляется трансфер всего доступного функционала узлов в глобальное сетевое пространство цифровой трансформации.

В новом пространстве благодаря свойству беспроводной программируемости сколь угодно больших сетей нет необходимости использовать бесконтрольно растущий «зоопарк» проблемно-ориентированных стандартов, технологий системно-функциональной интеграции разнородных ресурсов.

Вместе с этим в новом алгоритмическом пространстве открываются новые возможности для наращивания масштабов цифровой трансформации субъектных функций закрытой части систем второго поколения. Оставаясь *узким местом* таких систем, закрытая часть является основной причиной невозможности дальнейшей эволюции систем в направлении системно-целостного охвата всей совокупности распределённой информации ГКС.

Такой охват необходим для формирования сколь угодно больших, глобально-сильносвязных социальных, киберфизических, киберэкономических и других систем. Беспроводное программирование устраняет изначальные барьеры разнородности и делает возможным переход к вполне открытым системам. Такие системы, при отсутствии ограничений закрытой части, открывают путь к максимальным масштабам реализации цифровой трансформации больших глобально-сильносвязных (в том числе между собой) систем.

Необходимое условие реализуемости единого алгоритмического пространства — наличие эффективных решений по сетевой реализации модели ИДС при исполнении как прикладных вычислительных программ, так и системных функций по управлению их параллельным исполнением в распределённых сетевых ресурсах.

Возможности эффективного применения ИДС для реализации прикладных и системных функций показаны на примерах обработки видеoinформации в работах [24, 25], а также на примере построения сетевой высокопараллельной системы распределённых вычислений, решающей оптимизационную задачу высокой вычислительной сложности по поиску оптимальной конфигурации кольцевых коммутаторов [26].

Заключение

Растущее влияние ГКС на все сферы жизнедеятельности требует новых методологий междисциплинарных исследований, которые в обязательном порядке должны строиться с учётом влияния фундаментальных внутренних закономерностей развития ГКС на проблемы и приоритеты развития различных областей науки. Прежде всего, это те области наук управления, в которых цифровая трансформация предполагает массовое применение ГКС в социальных, киберфизических и киберэкономических системах, существенно меняющих характер участия человеческого фактора в процессах управления.

В данной работе рассмотрены элементы общей методологии, направленной на универсализацию и формирование системно-целостной цифровой трансформации, нацеленной на кардинальное упрощение и контролирование массовых процессов субъект ориентированного использования цифровых технологий в разных сферах жизни человека и общества.

Новизна результатов исследования:

- на основе анализа внутренних закономерностей развития и возрастающего влияния ГКС предложена классификация и определено направление эволюции больших систем;
- на основе новой модели распределённых вычислений и сетевцентрического управления в сколь угодно больших компьютерных сетях представлен системно-сбалансированный подход к универсализации методов цифровой трансформации;
- предложены принципы формирования в ГКС универсального и кибербезопасного алгоритмического пространства цифровой трансформации, рассмотрены особенности и перспективы развития больших систем в этом пространстве.

Направление дальнейших исследований связано с разработкой методов программирования в новом алгоритмическом пространстве и принципов построения на их основе общедоступных технологий бесшовного программирования.

Список литературы

- [1] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Проблемы программируемости, безопасности и надежности распределенных вычислений и сетевцентрического управления. Ч. 1. Анализ проблематики», *Проблемы управления*, 2016, №3, с. 49–57. [↑]₉₀
- [2] В. Рыжков, Е. Чернов, О. Нефедова, В. Тарасова. *Аналитический отчет: Цифровая трансформация в России*, 2018. [↑]_{93,99,100}
- [3] У. Р. Эшби. *Введение в кибернетику*, ИЛ, М., 1959, 432 с. [↑]_{98,108}
- [4] K. Skala, Z. Sojat. “The Rainbow: integrating computing into the global ecosystem”, MIPRO 2019 (20–24 May 2019, Opatija, Croatia), pp. 233–240. [↑]₉₉
- [5] G. Allen. “Potential and challenges of grid computing”, Mardi Gras’08: 15th Mardi Gras Conference on Distributed Applications (January 2008, Baton Rouge, Louisiana, USA) (Accessed: Jul. 2017). [↑]₉₉
- [6] *Everything you need to know about Digital Platforms*. [↑]₁₀₀
- [7] Y. Wang. “Post-cloud Computing Models: from Cloud to CDEF”, *Proceedings The 3rd International Workshop on Dew Computing*, 2018, 3 pp. [↑]₁₀₁
- [8] F. Durao, J. Fernando, S. Carvalho, A. Fonseca, V. C. Garcia. “A systematic review on cloud computing”, *J. Supercomput.*, **68**:3 (2014), pp. 1321–1346. [↑]₁₀₁
- [9] Y. Wang, T. Uehara, R. Sasaki. “Fog computing: Issues and challenges in security and forensics”, 2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference (1–5 July 2015, Taichung, Taiwan), pp. 53–59. [↑]₁₀₁
- [10] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu. “Edge computing: Vision and challenges”, *IEEE Internet Things J.*, **3**:5 (2016), pp. 637–646. [↑]₁₀₁
- [11] P. P. Ray. “An introduction to dew computing: Definition, concept and implications”, *IEEE Access*, **6** (2017), pp. 723–737. [↑]₁₀₁
- [12] С. Н. Конопатов, Н. В. Салиенко. «Анализ бизнес-моделей на основе платформ», *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент*, 2018, №1(32), с. 21–32. [↑]_{104,105}
- [13] A. K. Cebrowski, J. J. Garstka. “Network-Centric Warfare: Its Origin and Future”, *Naval Institute Proceedings*, vol. **124**/1/1, U.S.. Annapolis, Maryland, 1998. [↑]₁₀₄
- [14] Р. Арзуманян. «Теория и принципы сетевцентричных войн и операций», *«21-й Век»*, 2008, №2(8), с. 66–127. [↑]_{104,105}
- [15] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Графодинамические системы с сетевцентрическим управлением в математически однородном поле компьютерной информации», *Управление большими системами*, 2010, №30.1, с. 567–604. [↑]_{105,107}

- [16] В. Я. Цветков. «Распределенное управление», *Современные технологии управления*, 2017, №4(76), 7602, 12 с. [↑₁₀₆](#)
- [17] A. Chigani, J. D. Arthur, S. Bohner. *Architecting network-centric software systems: A style-based beginning*, 31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW 2007) (6–8 March 2007, Columbia, MD, USA), 10 pp. [↑₁₀₈](#)
- [18] Ю. С. Затуливетер. «Компьютерный базис сетевидного управления», *Труды российской конференции с международным участием «Технические и программные средства в системе управления, контроля и измерения»*, УКИ'10 (Москва, 18–20 октября 2010 г.), с. 17–37. [↑_{111,112,114,119}](#)
- [19] Ю. С. Затуливетер, А. В. Топорищев. «Язык Парсек: программирование глобально распределенных вычислений в модели исчисления древовидных структур», *Проблемы управления*, 2005, №4, с. 12–20. [↑_{113,123}](#)
- [20] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Принципы формирования универсального бесшовно программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства», *Программные системы: теория и приложения*, 5:1(19) (2013), с. 153–173. [↑₁₁₄](#)
- [21] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Проблемы программируемости, безопасности и надежности распределенных вычислений и сетевидного управления. Ч. 2. Подход к общему решению», *Проблемы управления*, 2016, №4, с. 58–69. [↑₁₁₄](#)
- [22] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Универсальное алгоритмическое пространство распределённых и параллельных вычислений», *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2018, №2, с. 78–93. [↑_{91,114,121}](#)
- [23] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко, С. Е. Артамонов, В. А. Козлов. «Элементы стратегии и архитектурные предпосылки опережения в области однокристальных многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом», *Приложение к журналу «Информационные технологии»*, 2014, №2, с. 1–32. [↑₁₂₀](#)
- [24] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «Организация распределенных вычислений в системе программирования ПАРСЕК на примере сжатия цифрового видео», *Проблемы управления*, 2003, №4, с. 6–10. [↑₁₂₅](#)
- [25] Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко, С. Е. Артамонов, В. А. Козлов, В. В. Крупкин, В. В. Сергеев, А. Ю. Соколов, А. В. Топорищев. «Разработка и испытание системы распределенных вычислений для сжатия цифрового видео в реальном времени», *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2006, №1, с. 27–32. [↑₁₂₅](#)
- [26] С. Е. Артамонов, Ю. С. Затуливетер, В. А. Козлов, В. С. Подлазов, В. В. Сергеев, А. В. Топорищев, Е. А. Фищенко. «Система распределенных вычислений в математически однородном поле исчисления древовидных

структур», *Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее»* (19–24 сентября 2011 г., г. Новороссийск, Россия), Изд-во МГУ, М., 2011, с. 349–355. [↑]₁₂₅

Поступила в редакцию 06.12.2019

Переработана 17.06.2020

Опубликована 27.08.2020

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. С. М. Абрамов

Пример ссылки на эту публикацию:

Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко. «К компьютерно-сетевым архитектурам для цифровой трансформации больших систем». *Программные системы: теория и приложения*, 2020, **11**:3(46), с. 85–131.

10.25209/2079-3316-2020-11-3-85-131

http://psta.psiras.ru/read/psta2020_3_85-131.pdf

Об авторах:

Юрий Семёнович Затуливетер

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Института проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук

0000-0002-4462-0098

e-mail: zvt@ipu.rssi.ru

Елена Алексеевна Фищенко

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Института проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук

0000-0003-4150-5649

e-mail: elena.fish@mail.ru

CSCSTI 50.05.03

UDC 004.9:004.9+004.7:004.272:004.41

Yuriy S. Zatuliveter, Elena A. Fishchenko. *Towards computer-network architectures for the digital transformation of large-scale systems.*

ABSTRACT. Based on the mathematical generalization of the classical model of the universal computer by J. von Neumann, the article proposes a new approach to eliminating the causes of reproduction of heterogeneity of hardware, software, and information resources in the global computer environment (GCE). The generalized model allows seamlessly extending the property of universal programmability from internal computers' resources to arbitrarily large networks. The hardware implementation of "heavy" system functions performed programmatically within operating systems cardinally increase cybersecurity. Analysis of trends in the development of large distributed systems has shown that existing technologies for functional integration of heterogeneous GCE resources (Grid, Cloud, peer-to-peer networks) have come close to the limits of their ability to increase the scale of such systems. Further increase in their size requires unacceptable costs to overcome extreme heterogeneity and ensure cybersecurity. The reasons for the heterogeneity of GCE are fundamental. They are hidden in the logic of the von Neumann bases of microprocessor architectures. TCP/IP network protocols legalize heterogeneity on a global scale and heuristic methods for integrating heterogeneous resources. The starting principles of GCE formation were not intended for a systemic-holistic solution to the problems of creating arbitrarily large distributed systems in GCE. The proposed model opens up opportunities for implementing a mathematically homogeneous, universal, seamless programmable, and cybersecurity algorithmic space for distributed computing in the GCE. With the elimination of heterogeneity at the level of mass applications, the cost of creating/developing the entire diversity of arbitrarily large distributed systems is cardinally reduced.

Key words and phrases: global computer environment, large-scale systems, digital transformation, heterogeneity, integration of network resources, tree-like structure calculus, distributed computing model, seamless programming, non-microprocessor architecture, cybersecurity, universal algorithmic space of distributed computing.

2020 *Mathematics Subject Classification:* 68Q01; 68U01

References

- [1] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. "Problems of programmability, security and reliability of distributed computing and network-centric control. Part 1: Problem analysis", *Problemy upravleniya*, 2016, no. 3, pp. 49–57 (in Russian). [↑]₉₀
- [2] V. Ryzhkov, Ye. Chernov, O. Nefedova, V. Tarasova. *Analyst report: Digital transformation in Russia*, 2018 (in Russian). [↑]_{93,99,100}
- [3] W. Ross Ashby. *An introduction to cybernetics*, Chapman & Hall LTD, London, 1956. [↑]_{98,108}
- [4] K. Skala, Z. Sojat. "The Rainbow: integrating computing into the global ecosystem", MIPRO 2019 (20–24 May 2019, Opatija, Croatia), pp. 233–240. [↑]₉₉
- [5] G. Allen. "Potential and challenges of grid computing", Mardi Gras'08: 15th Mardi Gras Conference on Distributed Applications (January 2008, Baton Rouge, Louisiana, USA) (Accessed: Jul. 2017). [↑]₉₉
- [6] *Everything you need to know about Digital Platforms*. [↑]₁₀₀
- [7] Y. Wang. "Post-cloud Computing Models: from Cloud to CDEF", *Proceedings The 3rd International Workshop on Dew Computing*, 2018, 3 pp. [↑]₁₀₁
- [8] F. Durao, J. Fernando, S. Carvalho, A. Fonseca, V. C. Garcia. "A systematic review on cloud computing", *J. Supercomput.*, **68**:3 (2014), pp. 1321–1346. [↑]₁₀₁
- [9] Y. Wang, T. Uehara, R. Sasaki. "Fog computing: Issues and challenges in security and forensics", 2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference (1–5 July 2015, Taichung, Taiwan), pp. 53–59. [↑]₁₀₁
- [10] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu. "Edge computing: Vision and challenges", *IEEE Internet Things J.*, **3**:5 (2016), pp. 637–646. [↑]₁₀₁
- [11] P. P. Ray. "An introduction to dew computing: Definition, concept and implications", *IEEE Access*, **6** (2017), pp. 723–737. [↑]₁₀₁
- [12] S. N. Konopatov, N. V. Saliyenko. "Platform-based business models", *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskiiy menedzhment*, 2018, no. 1(32), pp. 21–32 (in Russian). [↑]_{104,105}
- [13] A. K. Cebrowski, J. J. Garstka. "Network-Centric Warfare: Its Origin and Future", Naval Institute Proceedings, vol. **124**/1/1, U.S.. Annapolis, Maryland, 1998. [↑]₁₀₄
- [14] R. Arzumanyan. "Theory and principles of network-centric warfares and operations", *"21-y Vek"*, 2008, no. 2(8), pp. 66–127 (in Russian). [↑]_{104,105}
- [15] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. "Graph-dynamics systems with network-centric control in mathematically uniform field of computer information", *Upravleniye bol'shimi sistemami*, 2010, no. 30.1, pp. 567–604 (in Russian). [↑]_{105,107}
- [16] V. Ya. Tsvetkov. "Distributed management", *Modern Management Technology*, 2017, no. 4(76), 7602 (in Russian), 12 pp. [↑]₁₀₆
- [17] A. Chigani, J. D. Arthur, S. Bohner. *Architecting network-centric software systems: A style-based beginning*, 31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW 2007) (6–8 March 2007, Columbia, MD, USA), 10 pp. [↑]₁₀₈
- [18] Yu. S. Zatuliveter. "Computer basis for network-centric control", *Trudy rossiskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Tekhnicheskkiye i programnyye sredstva v sisteme upravleniya, kontrolya i izmereniya"*, UKI'10 (Moskva, 18–20 oktyabrya 2010 g.), pp. 17–37 (in Russian). [↑]_{111,112,114,119}

- [19] Yu. S. Zatuliveter, A. V. Toporishchev. “PARSEC language: programming globally distributed computations in the tree structure calculus model”, *Problemy upravleniya*, 2005, no. 4, pp. 12–20 (in Russian). [↑_{113,123}](#)
- [20] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. “Principles of formation of universal seamlessly programmable and cybersecure algorithmic space”, *Program Systems: Theory and Applications*, **5**:1(19) (2013), pp. 153–173 (in Russian). [↑₁₁₄](#)
- [21] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. “Problems of programmability, security and reliability of distributed computing and network-centric control. Part 2: The approach to general solution”, *Problemy upravleniya*, 2016, no. 4, pp. 58–69 (in Russian). [↑₁₁₄](#)
- [22] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. “The universal algorithmic space of distributed and parallel computing”, *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy*, 2018, no. 2, pp. 78–93 (in Russian). [↑_{91,114,121}](#)
- [23] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko, S. Ye. Artamonov, V. A. Kozlov. “Elements of the strategy and architectural conditions in advance of single-chip multiprocessor computers with massively parallelism”, *Prilozheniye k zhurnalu “Informatsionnyye tekhnologii”*, 2014, no. 2, pp. 1–32 (in Russian). [↑₁₂₀](#)
- [24] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko. “Organizathion of distributed calculations in PARSEC programming system with the example of digital video compression”, *Problemy upravleniya*, 2003, no. 4, pp. 6–10 (in Russian). [↑₁₂₅](#)
- [25] Yu. S. Zatuliveter, Ye. A. Fishchenko, S. Ye. Artamonov, V. A. Kozlov, V. V. Krupkin, V. V. Sergeyev, A. Yu. Sokolov, A. V. Toporishchev. “Development and testing of a distributed computing system for real-time digital video compression”, *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 1, pp. 27–32 (in Russian). [↑₁₂₅](#)
- [26] S. Ye. Artamonov, Yu. S. Zatuliveter, V. A. Kozlov, V. S. Podlazarov, V. V. Sergeyev, A. V. Toporishchev, Ye. A. Fishchenko. “Distributed computing system in a mathematically homogeneous field of calculus of tree structures”, *Trudy Mezhdunarodnoy superkomp'yuternoy konferentsii “Nauchnyy servis v seti Internet: ekzaflopsnoye budushcheye”* (19–24 sentyabrya 2011 g., g. Novorossiysk, Rossiya), Izd-vo MGU, M., 2011, pp. 349–355 (in Russian). [↑₁₂₅](#)

Sample citation of this publication:

Yuriy S. Zatuliveter, Elena A. Fishchenko. “Towards computer-network architectures for the digital transformation of large-scale systems”. *Program Systems: Theory and Applications*, 2020, **11**:3(46), pp. 85–131. (In Russian).

10.25209/2079-3316-2020-11-3-85-131

http://psta.psiras.ru/read/psta2020_3_85-131.pdf