

К УНИВЕРСАЛЬНОМУ АЛГОРИТМИЧЕСКОМУ ПРОСТРАНСТВУ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕМИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОМПЬЮТЕРНО-СЕТЕВЫХ АРХИТЕКТУР

Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко

Введение

Глобальные сети связывают разнообразные классы компьютерных устройств – от смартфонов до суперкомпьютеров. Высокий технический уровень компьютерных устройств, связанных сетями, предопределяет колоссальный совокупный функциональный и вычислительный потенциал глобальной компьютерной среды. Суммарный потенциал производительности этой среды уже составляет более 1-2 Эксафлопс (10^{18} флопс), совокупный объём памяти – более 1-2 Эксабайт (10^{18} байт) оперативной памяти и сотни эксабайт долговременной памяти. Параллельно с этой средой развиваются сети мобильной связи (более 4,5 млрд. абонентов). В стандартах 3G и 4G и др. они быстро интегрируются в сетевое пространство, увеличивая не только его вычислительный потенциал, но и принося новые функциональные возможности, связанные с перемещениями вычислительных узлов (портативные универсальные терминалы, сенсоры, мониторинг, навигация, управление и многое др.).

Стационарные и мобильные объекты, связываемые сетями, оснащаются разнообразными, в том числе программируемыми, сенсорными средствами и исполнительными механизмами, в том числе роботизированными. Такие объекты и системы обретают возможности автоматического многоканального съёма разнообразной информации. Глобальные сети предоставляют практически неограниченные возможности по пространственному переносу собираемой информации, её накоплению и переработке в сетевых ресурсах в целях управления производственными, экономическими и другими социально значимыми распределёнными процессами.

Глобальное информационное пространство, носителем которого является компьютерная среда, привнесло принципиально новое общесистемное качество – свойство глобальной информационной сильносвязности. В это новое пространство с *беспрецедентной* метрикой "всё зависит от всего и сразу" [1] включается всё больше субъектов, а также объектов и систем со встроенным компьютерным интеллектом, сильносвязность которых обеспечивается информационными и алгоритмическими взаимодействиями, осуществляемыми через глобальные и локальные компьютерные сети.

В таком пространстве сложившиеся механизмы управления и институты социальной самоорганизации утрачивают свою действенность, что ведёт к дестабилизации мировой социосистемы. С другой стороны глобальная компьютерная среда обладает практически неограниченным функциональным, вычислительным и когнитивным потенциалом, что открывает принципиально новые возможности для формирования *универсально программируемой среды сетецентрического управления*. Среда сетецентрического управления открывает возможности для полного раскрытия системообразующего потенциала компьютерной среды и направит его на решение качественно новых задач управления социосистемой в целом и её частей, нацеленных на эффективное функционирование и устойчивое развитие в глобальном информационном пространстве с новой метрикой.

При этом, очевидно, в компьютерной среде "центр тяжести" системоформирования смещается от локальных, разрозненных и слабосвязных компьютерных/сетевых архитектур к глобально распределённым и сильносвязным. Благодаря этому техногенные системы получают импульс к ускорению эволюции от слабосвязных к сильносвязным. Связность систем универсально программируемых вычислительных устройств воплощается универсальными компьютерными сетями, системообразующие свойства которых позволяют наращивать количество и разнообразие связываемых устройств, управляемых объектов и систем. Однако, эффективное использование практически неограниченного потенциала глобальной компьютерной среды в условиях её крайней разнородности практически невозможно. Требуются принципиально новые подходы, способные устранить первопричины непрерывного воспроизводства разнородных форм представления глобально распределённых данных и программ и обеспечить раскрытие этого потенциала для решения непрерывного спектра социально значимых задач.

Особенности систем сетецентрического управления

В условиях глобальной сильносвязности особое системоформирующее значение обретает концепция сетецентризма [1,2]. Несмотря на то, что наиболее систематическое развитие она до сих пор получает в рамках военной тематики [3-5], её применимость потенциально распространяется на все сферы влияния глобальных сетей. В своём предельном воплощении она предполагает системно-целостную компьютерно-сетевую глобализацию парадигмы управления [6], для которой требуется формирование в ресурсах глобальной компьютерной среды *математически однородного алгоритмического пространства* распределённых и параллельных вычислений [9]. В этом случае ресурсы глобальной компьютерной среды в нарастающих

масштабах будут трансформироваться в системно-целостные и *универсально программируемые управляющие агрегаты* с преобладанием распределённой *вычислительной* архитектуры Peer-to-Peer.

Системы сетевидного управления предназначены для решения задач управления разнообразными стационарными и мобильными объектами, а также распределёнными подсистемами разного уровня, составленными из таких объектов, функционирующими в сильносвязанном информационно-алгоритмическом пространстве на основе динамически формируемой общей информационной картины событий, которая представляет текущее состояние системы. При этом каждый объект в рамках компетенции в дополнение к автономно собираемой им информации также обеспечивается необходимой для решения его задач информацией, собранной и переработанной другими объектами [1].

На основе совокупной информации каждый из объектов в соответствии со своими "полномочиями" вырабатывает согласованные управляющие воздействия, направленные на достижение общей цели. Единая динамическая картина событий, формируемая в памяти компьютерной среды, представляющая текущее состояние всей системы в алгоритмизуемых формах, становится той основой, которая обеспечивает применение высокоинтеллектуальных алгоритмов выработки согласованных управляющих воздействий.

Отличительной чертой систем сетевидного управления является их глобальность в пространственном и функциональном плане. Они должны функционировать в режиме реального времени, в асинхронных режимах самоорганизации, быть устойчивыми к отказам узлов сети и линий связи, обладать высокой степенью защиты от несанкционированного доступа, обеспечивать введение в контуры обработки информации моделей управления с высокими уровнями интеллекта.

Целями интеллектуализации систем сетевидного управления являются наращивание:

- автономного интеллекта мобильных объектов, направленное на:
 - расширение функциональных возможностей каждого отдельного мобильного объекта;
 - повышение автономности поведения объектов в быстро меняющейся окружающей обстановке с достижением поставленных целей в условиях противодействия;
 - повышение качества управления собственными бортовыми ресурсами (оптимизация энергопотребления, реконфигурируемость при отказах и повреждениях и т.д.);
- группового автономного интеллекта систем мобильных объектов, обеспечивающего:
 - расширение функциональных возможностей адаптивного поведения объектов в групповых применениях;
 - повышение автономности группового маневрирования в быстро меняющейся окружающей обстановке с достижением поставленных целей в условиях противодействия;
 - достижение группового кумулятивного эффекта (одномоментное воздействие многих мобильных объектов на общую цель);
- общесистемного интеллекта больших распределённых систем, включающих сколь угодно большое количество компьютерных устройств, связанных сетями (от мобильных терминалов (типа смартфонов) до суперкомпьютеров), обеспечивающего:
 - повышение качества согласованного управления системным воздействием различных подсистем;
 - достижение в реальном времени согласованного взаимодействия больших систем стационарных и мобильных объектов, обеспечивающих адаптивное поведение с учётом оперативных, тактических и стратегических моделей угроз и пропорционального противодействия.



Рис.1. Универсальное алгоритмическое пространство сетецентрического управления [6]

Системы сетецентрического управления призваны решать задачи повышения интеллектуальных уровней автоматизации управления посредством алгоритмических взаимодействий в ходе универсально и бесшовно программируемой переработки в сетевых ресурсах данных высокой структурной сложности, см. рис.1.

Недостатки современных компьютерных сред

Современные средства и системы сетецентрического управления строятся в гетерогенных (разнородных) компьютерных средах. В их основе лежат два логически несвязанных уровня системообразующих "стандартов" [1]:

- вычислительные узлы реализуются посредством микропроцессорных компьютерных архитектур, являющихся разнородными воплощениями классической модели универсальных вычислений Дж. фон Неймана;
- сетевые протоколы TCP/IP обеспечивают масштабируемость глобальных/ локальных компьютерных сетей и надёжную передачу пакетов данных между вычислительными узлами по разным маршрутам.

Микропроцессорные архитектуры стали индустриальным воплощением классической компьютерной аксиоматики (модели Дж. фон Неймана), которая де-факто составила логический стандарт массово-индустриального производства компьютеров и программ. На этой основе стихийным образом до сих пор обеспечивался сверхбыстрый и, главным образом, стихийный (слабо контролируемый), рост компьютерной среды, связывающей большие количества разнородных вычислительных узлов с разнородными формами представления данных и программ.

Микропроцессорные архитектуры лежат в основе современной компьютерной элементной базы. Сети строятся из компьютеров с такими архитектурами. Согласно модели фон Неймана свойство их универсальности изначально замкнуто во внутренних ресурсах. Модель вычислений, которая могла бы распространить свойство универсальной программируемости на любую совокупность компьютеров связанных сетями, в настоящее время отсутствует. Отсюда крайне высокая трудоёмкость разработки больших систем распределённых вычислений.

В отсутствие такой модели доминируют технологии, которые в ограниченных масштабах (корпоративных уровней) расширяют применения распределённых вычислений в разнородных глобально связанных гетерогенных сетевых ресурсах посредством создания громоздких промежуточных системных программных слоёв. В силу многовариантности интеграции разнородных ресурсов, существующие подходы в принципе не способны охватывать совокупные ресурсы глобальных сетей. Они применимы лишь к ограниченному ансамблю компьютеров связанных сетями. К наиболее известным таким технологиям относятся Grid-системы, облачные вычисления. С увеличением размеров сетей и размерности задач управления (что необходимо для расширения масштабов применимости сетецентрических систем) главной проблемой

становится преодоление «проклятия комбинаторной сложности». Путь лобового преодоления барьеров комбинаторной сложности – это путь к разорению экономики любой страны.

С ростом масштабов глобализации гетерогенных компьютерных сред на системных уровнях нарастающим образом проявились многовариантные проблемы интеграции разнородных данных, программ процессов и систем, которые имеют комбинаторный характер. Комбинаторная сложность системно-функциональной интеграции гетерогенных ресурсов глобальных сетей требует опережающего увеличения финансовых, технологических и интеллектуальных ресурсов, которые неограниченны. Являясь следствием разнородности, она стала фундаментальным препятствием на путях массового применения систем распределённых вычислений. А это – свидетельство исчерпания системообразующего потенциала микропроцессорных архитектур. Ключевой задачей становится *выявление и устранение причин непрерывного воспроизводства разнородных форм представления данных и программ* [1,2,6].

Основные причины и признаки исчерпания потенциала микропроцессорных архитектур:

- крайняя разнородность аппаратных и программных платформ, неустраняемая в рамках микропроцессорных архитектур;
- отсутствие единого адресного пространства, охватывающего ресурсы оперативной памяти компьютеров, связанных сетями;
- свойство универсальной программируемости изначально замкнуто (локализовано) во внутренних ресурсах компьютеров, что не позволяет бесшовно и единообразно распространять его на сетевые ресурсы;
- сложное в силу разнородности сетевое оборудование, многослойные сетевые протоколы передачи данных не предлагают эффективной поддержки глобально распределённых вычислений в сетевых ресурсах;
- системно-функциональная интеграция в сетях требует дополнительного формирования специализированных промежуточных программных слоёв, при этом
 - происходит увеличение количества избыточных, трудно контролируемых степеней свободы;
 - усложняются проблемы системного и сетевого администрирования;
 - повышаются риски угроз несанкционированного доступа, усложняются проблемы защиты информации;
 - широко распространённые методы борьбы с системной сложностью машинной среды посредством наращивания всё новых слоёв программных сервисов не имеет долгосрочных перспектив ввиду роста системной разнородности, ведущей к опережающему росту комбинаторной сложности на общесистемных уровнях.

Комбинаторная сложность системной интеграции в разнородных средах и неустраняемая локализация свойства универсальной программируемости во внутрикомпьютерных ресурсах узлов с микропроцессорными архитектурами становятся непреодолимыми препятствиями на путях полномасштабной глобализации систем сетецентрического управления. Отсюда следует, что полномасштабное решение всего разнообразия задач сетецентрического управления в рамках микропроцессорных архитектур практически невозможно. Проблематика сетецентрического управления в средне и долгосрочной перспективе развития требует обобщения классической модели универсальных вычислений с обоснованием *принципиально иной – немикропроцессорной – компьютерной архитектуры, отвечающей требованиям массовой применимости, и, соответственно, элементной базы на этой основе.*

Необходим переход к компьютерным архитектурам и аппаратным средствам с качественно новым уровнем универсального системного интеллекта управления сетевыми ресурсами. Такой интеллект должен на системном уровне единообразно обеспечить [1,2,6-8]:

- свободную масштабируемость и конфигурируемость вычислительных сред в сетевых ресурсах;
- устранение причин непрерывного воспроизводства разнородных форм представления данных и программ, а значит и комбинаторной сложности интеграции распределённых данных, программ процессов и систем;
- бесшовное распространение свойства универсальной программируемости на совокупные сетевые ресурсы;
- организацию надёжных вычислений и процессов управления в ненадёжных вычислительных средах.

В основу таких средств должна быть положена новая элементная база в виде универсальных компьютеров с *немикропроцессорной* компьютерно-сетевой архитектурой, обладающих встроенными средствами сетевой маршрутизации и на аппаратном уровне обеспечивающих бесшовное программирование структурно сложных распределённых вычислений в математически однородном и универсальном алгоритмическом пространстве распределённых и параллельных вычислений.

К универсальному алгоритмическому пространству распределённых вычислений

В рамках нового подхода [1,6] на уровне постулатов универсального счёта классической модели фон Неймана, лежащей в основе *микропроцессорных* архитектур, выявлены *избыточные степени свободы* управления вычислениями. Они являются причиной неконтролируемого воспроизводства программистами разнородных форм представления данных и программ. Посредством математического обобщения классической модели вычислений проведена её минимальная коррекция, которая устранила избыточные степени свободы и предоставила математически замкнутую форму представления данных и программ в виде двоичных деревьев. Минимальная коррекция классической модели позволяет:

- распространить системообразующие свойства с внутрикомпьютерных ресурсов на любые совокупности связанных сетями компьютеров, в том числе:
 - устранить причины непрерывного воспроизводства разнородных форм представления глобально распределённых данных и программ;
 - сформировать единое адресное пространство оперативной памяти всех компьютеров связанных сетями;
 - бесшовно распространять свойство универсальной программируемости в едином адресном пространстве на любые компьютеры, связанные сетями;
- сохранить достоинства классической модели – простоту логических правил универсального счёта и способов их эффективной реализации посредством существующих технологий проектирования и изготовления СБИС.

Проведённое обобщение классической модели вычислений [1,6] устраняет субъективный произвол программистов в формах представления данных и программ и распространяет свойство универсальной программируемости на любую совокупность компьютеров связываемых сетями. В обновлённой компьютерной аксиоматике открываются возможности построения универсальных вычислительных узлов с немикропроцессорной архитектурой, обладающей математически замкнутой системой команд, что кардинально упрощает программирование задач глобально распределённой обработки данных высокой структурной сложности. Кроме этого, особая организация "умной" оперативной памяти в такой архитектуре обеспечивает реализацию на аппаратном уровне:

- основных функций ядра операционных систем (управление вводом/ выводом, динамическое перераспределение памяти, управление многозадачным исполнением программ, управление сетевыми обменами данных), что позволяет в системах реального времени на порядки ускорить системную реактивность, в том числе при обработке сложных данных с интенсивно меняющимися структурами;
- защиты от несанкционированного доступа, которая изолирует физическое адресное пространство памяти от вредоносного вторжения.

Предлагаемые немикропроцессорные архитектуры обеспечат формирование в сетевых ресурсах математически однородного алгоритмического пространства распределённых и параллельных вычислений для формирования систем сетцентрического управления, обладающее следующими свойствами [1,2,6-8]:

- устранение внутрикомпьютерных причин разнородности и комбинаторной сложности интеграции глобально распределённых данных, программ, процессов и систем;
- обеспечение структурной целостности глобально распределённых данных и программ;
- распространение свойства универсальной программируемости на сетевые ресурсы и бесшовное программирование задач переработки структурно-сложной информации;
- свободная масштабируемость и динамическая реконфигурируемость компьютерной среды;
- высокая надёжность распределённых вычислений и процессов управления в условиях недетерминированного доступа к вычислительным узлам и внешних деструктивных воздействий.

Перечисленные свойства компьютерной среды встраиваются в немикропроцессорную архитектуру вычислительных узлов. Эти системные качества единообразно и беззатратно наследуются всеми программами прикладных задач сетцентрического управления. Машинная среда становится для программистов "прозрачной", что позволяет минимизировать расходы и время при разработке, эксплуатации и модернизации прикладных решений.

Требования к элементной базе

В качестве основы для принципиально новой элементной базы, предлагается универсальный сетевой транспьютер с немикропроцессорной архитектурой, см. рис.2. Он представляет собой "Систему-на-Кристалле" (СнК), которая обладает аппаратно встроенными в УУ функциями сетевой маршрутизации и ядра операционных систем, которые реализуются на уровне оперативной памяти. Тем самым, в состав данной архитектуры вводится "умная" память большого объёма, которая позволяет реализовывать системный интеллект управления локальными и глобально распределёнными вычислительными процессами без использования

операционных систем. Это необходимо для формирования в глобальных сетях универсального и бесшовного алгоритмического пространства распределённых/ параллельных вычислений [9].

В отличие от классических транспьютеров [10], использовавшихся для построения многопроцессорных вычислительных систем с локальными межпроцессорными связями, транспьютер с немикропроцессорной архитектурой, встроенными средствами маршрутизации и протоколами, поддерживающими распределённые вычисления в ресурсах глобальных сетей, предназначен для формирования в глобальной сети математически однородного и бесшовно программируемого алгоритмического пространства распределённых/параллельных вычислений.

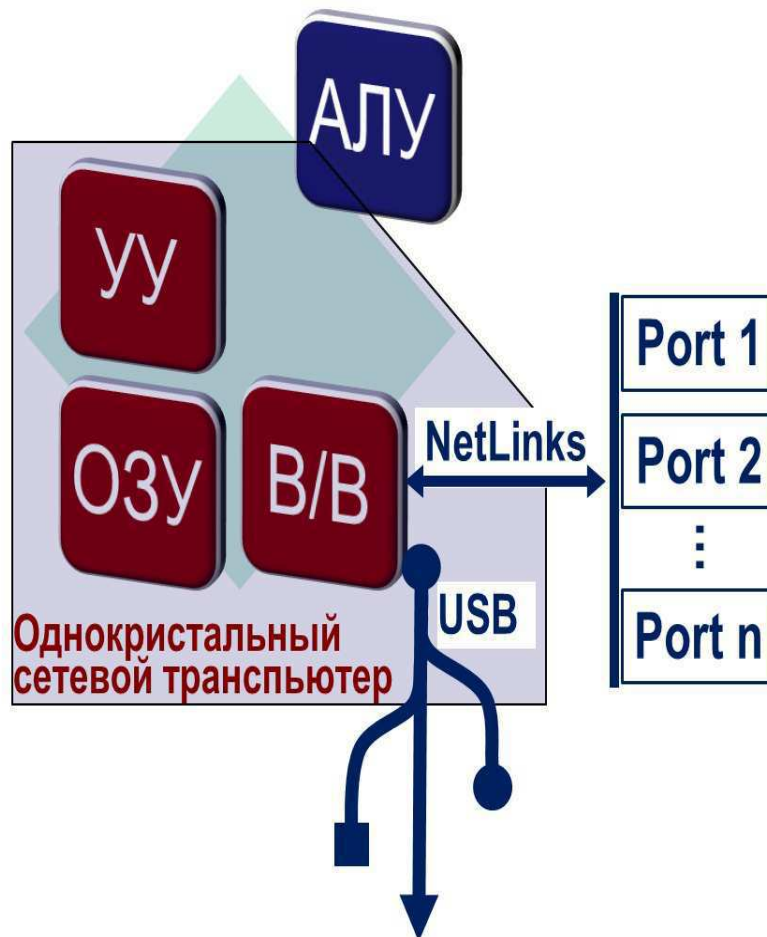


Рис.2. Универсальный сетевой транспьютер с немикропроцессорной архитектурой

"Умная память" в рамках немикропроцессорной архитектуры предоставляет следующие новые возможности:

- представляет линейную оперативную память как универсальный носитель структурно сложных данных с динамическим перераспределением ячеек в целях повторного их использования при интенсивном изменении структур данных в ходе переработки;
- на аппаратном уровне выполняет ключевые функции ядра операционных систем, чем достигается кардинальное снижение системной сложности и улучшение системных характеристик;
- обеспечивает высокоэффективную аппаратную защиту от несанкционированного доступа.

Однокристалльный сетевой транспьютер с немикропроцессорной архитектурой, обладающий значительным объёмом "умной памяти" (рис.2) может использоваться двояко.

Во-первых, как универсальный автономный вычислительный узел глобальных/локальных сетей, не требующий для своей работы отдельной операционной системы.

Во-вторых, как сетевой узел, который размещается в составе сетевой платы компьютеров – носителей существующих операционных систем и программного обеспечения. При этом такой транспьютер обеспечивает функциональную интеграцию существующих компьютерных и программных систем в единое алгоритмическое пространство.

В целях наращивания управляющего интеллекта для обеспечения масштабирования вычислительной производительности в диапазоне 1-100Тфлпс – 1Пфлпс (и более – вплоть до ExaScale) существенным дополнением сетевого транспьютерного узла могут стать многопроцессорные расширители с массовым параллелизмом [11].

Для решения задач сетевидного управления новый однокристалльный транспьютерный узел может содержать в своём составе реконфигурируемый набор устройств сопряжения с объектом (УСО), реализуемый посредством ПЛИС-технологии, который включает типовые блоки (библиотечный набор) и специфические блоки (программно конфигурируются с учётом уникальных особенностей конкретных объектов сопряжения).



Рис.3. Универсальная среда сетевидного управления на основе сетевого транспьютера

Универсальные сетевые транспьютеры открывают возможности формирования в ресурсах глобальных сетей единого алгоритмического пространства (рис.3) для свободно масштабируемых реализаций сетевидного управления разнообразными распределёнными системами стационарных и мобильных объектов. Одна из возможных сфер применения – рис.4.



Рис.4. Возможные применения универсальной среды сетевидного управления

В едином алгоритмическом пространстве сетевые транспьютеры, через которые разнообразные управляемые объекты подключаются к глобальной сети, позволяют напрямую (без системных программных слоёв) связываться между собой в свободно конфигурируемые, универсально и бесшовно программируемые вычислительные среды. Они являются носителями пространства распределённых и параллельных вычислений, которое в едином адресном поле охватывает все потенциально доступные сетевые ресурсы. При этом на аппаратном уровне (без использования ОС или других системно-программных слоёв) достигается полная программная совместимость всех вычислительных узлов, функционирующих в этом пространстве.

Заключение

В математически однородном алгоритмическом пространстве распределённых и параллельных вычислений, формируемом посредством сетевых транспьютеров с немикропроцессорной архитектурой, открываются принципиально новые возможности решения задач сетецентрического управления. При этом обеспечивается кардинальное улучшение следующих системных качеств:

- снижение себестоимости глобально распределённых систем (на порядки) и сроков их создания (в разы);
- повышение функциональных возможностей по обработке сложно организованных данных с высокой динамикой изменений их структур (позволяет сводить к минимуму ограничения на классы задач интеллектуализации систем сетецентрического управления);
- снижение (на порядки) времени реакции вычислительных узлов на внешние и внутренние асинхронные прерывания, что создаёт высокий запас динамической устойчивости в условиях реального времени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ю.С. Затуливетер Компьютерный базис сетецентрического управления // Российская конференция с международным участием "Технические и программные средства в системе управления, контроля и измерения" (УКИ'10). Труды конференции. Москва, 18-20 октября 2010 г. Учреждение Российской Академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – С.17-37. URL: <http://cmm.ipu.ru/proc/%D0%97%D0%B0%D1%82%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%20%D0%AE.%D0%A1.%20.pdf>.
2. Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко. Графодинамические системы с сетецентрическим управлением в математически однородном поле компьютерной информации // Управление большими системами. Специальный выпуск 30.1 "Сетевые модели в управлении". –М.: ИПУ РАН, 2010. –С.567-604. URL: http://ubs.mtas.ru/search/redirect.php?xml_id=18105&event1=download&event2=ubs&event3=upload/library/UBS30131.pdf&goto=/upload/library/UBS30131.pdf.
3. С.А. Паршин, Ю.Е. Горбачев, Ю.А. Кожанов. Современные тенденции развития теории и практики управления в вооруженных силах США. –М.: ЛЕНАНД, 2009. –272 с.
4. В.М. Буренок Технологии, вооружения, войны. –СПб: ВАТТ им. г.а. А.В. Хрулева, 2011, 188 с.
5. Л.В. Савин Сетецентрическая и сетевая война. Введение в концепцию. –М.: Евразийское движение, 2011. –130с.
6. Ю.С. Затуливетер Проблемы глобализации парадигмы управления в математически однородном поле компьютерной информации // Проблемы управления. 2005. – № 1. – Ч. I. – С. 1-12; №2. – Ч. II. – С. 13-23. URL: <http://zvt.hotbox.ru>.
7. Ю.С. Затуливетер., Е.А. Фищенко., И.А. Ходаковский Программные методы повышения надежности структурно-сложных распределенных вычислений и процессов управления / Надежность., – 2009. – № 1. – С.42-49.
8. Ю.С. Затуливетер, И.А. Ходаковский Программные методы повышения устойчивости распределённых вычислений процессов управления к деструктивным воздействия // Надежность. – 2009. – № 2. – С, 3-14.
9. Ю.С. Затуливетер ExaScale: на пути к единому пространству распределенных и параллельных вычислений // Научный сервис в сети Интернет: Эксафлопсное будущее: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (20-25 сентября 2010 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2011. С.10-14. URL: <http://agora.guru.ru/abrau2011/pdf/10.pdf>.
10. URL: <http://transputer.net/fbooks/tarch/tarch.html>
11. С.Е. Артамонов, Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко Предпосылки к созданию однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М производительностью 1-10 Tflops // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011). Труды международной научной конференции (Москва, 28марта-1апреля 2011г.). С.402-410. URL: <http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/short/012.pdf>, http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/talks/012_zatuliveter_talk.pdf.