

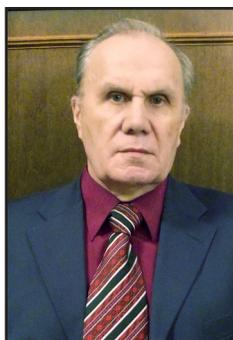


# Киберфизические системы в управлении транспортом



Борис ЛЁВИН  
Boris A. LYOVIN

Виктор ЦВЕТКОВ  
Victor Ya. TSVETKOV



*Лёвин Борис Алексеевич – доктор технических наук, профессор, ректор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.*

*Цветков Виктор Яковлевич – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития НИИАС, Москва, Россия.*

## Cybernetics and Physical Systems for Transport Management

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 143)

**Актуальность темы обусловлена необходимостью совершенствования управления сложными транспортными системами в условиях возрастания объёмов информации и многомерности управленческих ситуаций. В основе исследования – оценка опыта и новых возможностей применения киберфизических систем (КФС) в управлении транспортом.**

**Статья знакомит с концептуальной и компонентной моделями КФС, показывает их сходство и различия с другими системами. В качестве методологического инструментария авторами использован системный и структурный анализ. Выявлены коммуникационные особенности КФС, которые являются условием её реализации при организации высокоскоростного движения. КФС оцениваются как ещё один шаг к созданию интеллектуальных систем нового поколения.**

*Ключевые слова:* транспорт, киберфизические системы, управление, встроенные системы, повсеместные вычисления, Интернет вещей, технология, модели управления.

**П**роблема управления транспортом тесно связана с современной проблемой «больших данных» [1, 2]. Рост сложности управленческих ситуаций и систем управления требует применения радикальных научных решений. Таким вариантом в числе прочего может быть распределённое интеллектуальное сетевое управление, основанное на применении киберфизических систем [3].

Киберфизические системы (КФС) или cyber-physical system (CPS) применяют интеллектуальное внутрисетевое моделирование. Концептуально механизм их работы аналогичен мультиагентным системам [4], но с большей мобильностью агентов и включением в эту среду распределённого коллективного вычисления. Реализация внутрисетевого интеллектуального моделирования может существенным образом повысить эффективность управления транспортом и его инфраструктурой, особенно в сложных и чрезвычайных ситуациях. Киберфизические системы освещены в литературе достаточно широко. Об их применении для управления транспортом написано меньше, что обусловлено необходимостью исследования специальных технологий и моделей. Это

делает актуальным анализ реальных условий и модельных схем для реализации формирующегося подхода.

## ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ КФС

Киберфизические системы создавались на основе интеграции ряда предшествующих технологий. К основным технологиям поддержки киберфизических систем относят: технологию Интернет вещей (IoT), встроенные системы (embedded system), технологии повсеместных вычислений (Ubiquitous computing), специальные технологии сетевого обмена.

*Интернет вещей* (Internet of Things – IoT) – технология [5], в которой любой физический объект может быть соединён с любым другим физическим объектом. Структурно IoT может быть представлена как специальная сеть или распределённая система, включающая межсетевое взаимодействие физических устройств, транспортных средств, зданий и других объектов, встроенных в электронику (программное обеспечение, датчики, исполнительные механизмы). Технология IoT позволяет объектам, объединённым в эту специальную сеть, собирать данные и обмениваться ими. В аспекте обработки информации и вычислений IoT рассматривают и называют вычислительной сетью. Отличие IoT как системы от обычных коммуникационных систем (обычная сеть, обычный Интернет) в наличии возможности самостоятельно производить вычислительные операции. Именно это свойство существенно развито в КФС.

В 2013 году Глобальная инициатива по стандартизации в Интернете вещей (IoT–GSI) определила IoT как «инфраструктуру информационного общества» [6]. Технология Интернет вещей позволяет фиксировать и контролировать объекты удалённо через существующую сетевую инфраструктуру. Этим она создаёт возможности для интеграции физического мира в компьютерные системы, что облегчает условия для функционирования КФС. Если IoT дополняется датчиками и приводами, то эта технологическая система преобразуется в более общий класс распределённых систем – киберфизические системы.

На практике Интернет вещей трактуется как технология, как сеть и как коммуникационная система. Это обусловлено главными

функциями IoT: сервисными, коммуникационными и информирующими. Все эти функции связаны с технологией и технологической составляющей. В отличие от IoT киберфизическая система трактуется именно как система. Это обусловлено тем, что главным в ней являются технические устройства: исполнительные механизмы и распределённая система датчиков и приводов. Технологическая компонента остаётся вспомогательной. КФС более закрытая по сравнению с IoT.

*Встроенная система* (embedded system – ES) (также – встраиваемая система) является важным техническим и технологическим компонентом КФС. Эта компонента представляет собой компьютерную систему со специализированными функциями как часть крупной механической или управленческой системы. При этом она часто имеет ограничения в реальном времени по вычислительным возможностям [7]. ES встроена как часть полного устройства, включающая аппаратные и механические детали. Основное назначение встраиваемых систем – контроль других устройств. Девяносто восемь процентов всех микропроцессоров производятся как компоненты встроенных систем [8].

Современные встраиваемые системы часто основаны на микроконтроллерах (CPU со встроенной памятью). Используемый в ES процессор имеет разные типы, начиная от общего назначения и заканчивая специализированными. Общим классом выделенных процессоров является цифровой сигнальный процессор (DSP). Встраиваемые системы варьируются от портативных устройств, вроде цифровых часов и MP3-плееров, до таких крупных стационарных установок, как светофоры, бортовые компьютеры, управляющие расходом топлива в автомобиле, гибридные автомобили, МРТ и авионика. Сложность варьируется от одного микроконтроллера до систем высокого уровня с несколькими устройствами, периферийными устройствами и сетями, установленными внутри большого шасси или корпуса.

Впервые встраиваемые системы были применены для управления транспортными средствами, правда, в космической отрасли. Одной из таких пионерных систем был компьютер Apollo Guidance Computer, разработанный как элемент проекта Apollo. Более ранней версией встроенной системы был Autonetics D-17 – компьютер, выпущенный



в 1961 году для управления ракетой Minuteman. В 1966 году D-17 заменили новым вариантом.

В процессах транспортировки регулярно используют встроенные системы. Инерциальные системы наведения и приёмники GPS базируются на них. Их содержат различные электродвигатели – бесщеточные постоянного тока, асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока – применяют электрические/электронные контроллеры двигателей. Автомобили, электромобили и гибридные автомобили всё чаще используют встроенные системы, чтобы максимизировать эффективность и уменьшить загрязнение. Другие автомобильные встроенные системы безопасности входят в антиблокировочную тормозную систему (ABS), систему электронного контроля устойчивости (ESC/ESP), систему контроля тяги (TCS) и автоматический привод на все колёса. Такое обилие примеров в аналоговой сфере создаёт предпосылки для применения КФС на железнодорожном транспорте.

**Повсеместные вычисления** (Ubiquitous computing) – технологическая компонента КФС. Этот термин переводят также как все-ческие вычисления. Повсеместные вычисления являются обязательным компонентом и отличительным компонентом КФС. Они задают отличие киберфизических систем от систем обычных исполнительных устройств и пассивных распределённых систем. Повсеместные вычисления создают возможность самостоятельного анализа и обработки информации внутри КФС.

Как самостоятельная концепция повсеместное вычисление существует не только в КФС, но и в программной инженерии [9] и информатике, где вычисления производятся в любое время и везде. В отличие от применения настольных компьютеров повсеместное вычисление может происходить с использованием любого устройства,

в любом месте и в любом формате. Пользователь взаимодействует с компьютером, который может существовать во многих различных формах, включая портативные, планшеты и терминалы, в таких бытовых объектах, как холодильник или очки. Основные технологии для поддержки повсеместных вычислений включают Интернет, расширенное промежуточное программное обеспечение, операционную систему, мобильный код, датчики, микропроцессоры, интерфейсы ввода/вывода и пользовательские интерфейсы, сети, мобильные протоколы, местоположение и позиционирование.

Эта технология трактуется также как «распространяющиеся вычисления» (pervasive computing) [10], «окружающий интеллект» (ambient intelligence) [11] или «всякое обеспечение» (everyware) [12]. Каждый термин подчёркивает определённые аспекты технологии. Кроме того, эту технологию называют: физические вычисления, Интернет вещей, тактильные вычисления. Вместо того чтобы предлагать единое определение для этих связанных терминов, была предложена таксономия свойств для повсеместного вычисления, из которой можно описать различные виды или разновидности повсеместных систем и приложений.

Вездесущие вычисления касаются широкого круга тем исследований, включая распределённые вычисления, мобильные вычисления, локальные вычисления, мобильные сети, контекстно-зависимые вычисления, сенсорные сети, взаимодействие между людьми и компьютером и искусственный интеллект. По сути, получается, что эта технология дополняет другие технологии для формирования киберфизических систем и обеспечивает их адаптивность и активность.

## РАЗВИТИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Киберфизические системы возникли в результате развития технических средств и вычислительных технологий. На рис. 1 приведена тринитарная [13] концептуальная схема киберфизической системы. Она определяется тремя сущностями: коммуникация, вычисление и управление, которые объединяет информация. Главными функциями киберфизических систем является обработка



Рис. 1. Тринитарная концептуальная схема КФС.

информации (вычисление), интеллектуальная коммуникация и управление.

На рис. 2 приведена компонентная модель киберфизической системы, которая включает две группы компонент – эволюционную и технологическую.

Эволюционные компоненты послужили базой для появления предпосылок к созданию КФС. Технологические компоненты служат основой реализации конкретной КФС. Они рассмотрены выше. Естественно, реализация системы может быть различной, поскольку она адаптируется «под задачу».

Большое значение киберфизические системы имеют для крупномасштабных распределённых систем автоматизации и управления, к числу которых относится сфера транспорта.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МОДЕЛИ

Киберфизические системы являются высокоадаптивными, поэтому их реализация зависит от ставящейся задачи и объекта управления. Целесообразность применения киберфизических систем возникает при управлении сложными системами и сложными управленческими ситуациями. В аспекте вычислений КФС можно сравнить с системами параллельных вычислений. Для простых ситуаций они неэффективны, а для сложных незаменимы.

Недостатком КФС является их сложность, что требует привлечения специалистов для их создания и поддержки. Сложность киберфизических построений обуславливает и сложность общего определения этих систем. На практике дают определение через перечисление функций. Поэтому можно дать несколько определений КФС по разным аспектам.

В аспекте интегрированных систем киберфизические системы представляют собой комплекс вычислительных, сетевых и физических процессов.

В аспекте управления киберфизические системы – это распределённые системы управления, которые содержат встроенные компьютеры и вычислительные узлы и управляют физическими процессами.

В аспекте методики вычисления киберфизические системы представляют собой распределённые системы управления, которые содержат цепи обратной связи, в кото-

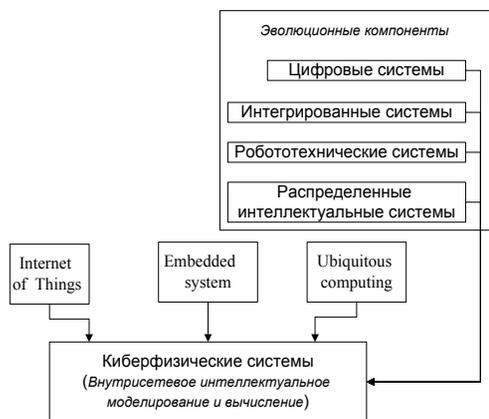


Рис. 2. Компонентная модель киберфизической системы.

рых физические процессы влияют на вычисления и наоборот.

Модели, используемые в КФС, делятся на концептуальные, математические, управленческие, технологические и базисные. КФС как системы управления ориентированы преимущественно на управления подвижными объектами [14]. При этом следует отметить, что одной из целей при создании КФС было отражение киберугроз и прочих угроз. Подобная цель сохранилась и в настоящее время. Однако такая возможность означает, что КФС приспособлены к работе с быстроменяющимися ситуациями и изменением цели. Это создаёт им преимущество как системам многоцелевого управления [15].

Концептуальные модели КФС строятся на основе информационных конструкций [16]. Базисные модели строятся на основе информационных единиц. Информационные единицы образуют языковую среду, что в соответствии с теорией семиотического управления служит основой интеллектуального управления. В аспекте взаимодействия киберфизические системы используют новый тип моделей информационно-физического взаимодействия. В аспекте сетевого взаимодействия киберфизические системы используют новый тип моделей сетевого взаимодействия – внутрисетевое онлайн моделирование. В аспекте интеллектуальной обработки информации киберфизические системы используют новый тип самоверифицируемых моделей и моделей внутренней онлайн оптимизации.

Именно наличие интеллектуальных моделей делает КФС устойчивыми к киберата-

кам и повышает степень их безопасности. Это свойство важно при обеспечении безопасности движения на транспорте.

Выделяется направление применения КФС на транспорте в виде транспортных киберфизических систем (ТКФС). При этом разделяют два качественных типа ТКФС: внутренняя система внутри движущегося объекта и внешняя система, объединяющая комплекс движущихся объектов, например внутри мегаполиса. Системы второго типа решают задачи управления трафиком движения в системе транспортных потоков [17]. Системы первого типа решают задачи управления отдельным объектом в сложной динамически меняющейся ситуации [18], например скоростной поезд или баллистическая ракета в условиях противоракетной ситуации.

## ВЫВОДЫ

Пока не существует формального и строгого определения понятия киберфизической системы, хотя в ряде работ сформулированы характерные свойства таких систем. Принципиальным свойством КФС является включение в их структуру интеллектуальных узлов обработки информации. Это относит их к распределённым интеллектуальным системам.

КФС более сложные системы управления в сравнении со всеми существующими системами управления транспортом, включая ИТС. КФС считаются распределёнными сетевыми системами, но отличаются от коммуникационных систем наличием интеллектуальных узлов и свойством самоверифицируемости и онлайн модификации потоков. В обычных сетевых системах это осуществляется извне пользователем.

Опыт применения КФС в транспортной сфере (в первую очередь авиация, ракетная техника) даёт основание видеть их и КФС в сфере железнодорожного транспорта, прежде всего высокоскоростного [14]. КФС в отличие от ИТС более устойчивы к кибератакам, благодаря наличию автономного управления и принципов саморегуляции.

В целом анализ возможностей КФС позволяет надеяться на прогресс в освоении киберфизических подходов и моделей управ-

ления, интеграции исполнительных и сенсорных устройств в единый комплекс, преобразовании отдельных интеллектуальных узлов в классической автоматизированной системе управления. Продуктивным следует считать и продолжение всех исследований в области КФС, причём в равной степени это касается и теории, и технологий, и электронного сопровождения информационных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лёвин Б. А. Комплексный мониторинг транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 1. – С. 14–21.
2. Чехарин Е. Е. Большие данные: большие проблемы // Перспективы науки и образования. – 2016. – № 3. – С. 7–11.
3. Khaitan *et al.* «Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey», IEEE Systems Journal, 2014, 9(2), pp. 1–16. DOI: 10.1109/JSYST.2014.2322503.
4. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Применение мультиагентных систем в интеллектуальных логистических системах // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 6. – С. 107–109.
5. Дешко И. П., Кряженков К. Г., Цветков В. Я. Устройства, модели и архитектуры Интернета вещей. – М.: Макс Пресс, 2017. – 88 с.
6. Internet of Things Global Standards Initiative. ITU. <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>. Доступ 10.04.2017.
7. Barr M. «Embedded Systems Glossary». Neutrino Technical Library. <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/Glossary>. Доступ 10.04.2017.
8. Barr M. «Real men program in C». Embedded Systems Design. TechInsights (United Business Media). P. 2.
9. Дешко И. П., Кряженков К. Г., Цветков В. Я. Системная и программная инженерия: Учебное пособие. – М.: Макс Пресс, 2018. – 80 с.
10. Nieuworp E. «The pervasive discourse». Computers in Entertainment, 2007. 5 (2): 13. DOI: 10.1145/1279540.1279553.
11. Hansmann U. [et al.]. Pervasive Computing: The Mobile World. Springer, 2003.
12. Greenfield A. Everyware: the dawning age of ubiquitous computing. New Riders, 2006. Pp. 11–12.
13. Цветков В. Я. Триада как интерпретирующая система // Перспективы науки и образования. – 2015. – № 6. – С. 18–23.
14. Tsvetkov V. Ya. Information Management of Mobile Object // European Journal of Economic Studies, 2012, Vol. 1, № 1, pp. 40–44.
15. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management // European Journal of Economic Studies 2012, Vol. 2, № 2, pp. 140–143.
16. Дешко И. П. Информационное конструирование: Монография. – М.: Макс Пресс, 2016. – 64 с.
17. Jianjun S. *et al.* The analysis of traffic control Cyber-physical systems // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Т. 96. – С. 2487–2496.
18. Cartwright R. *et al.* Cyber-physical challenges in transportation system design // National workshop for research on highconfidence transportation Cyber-physical systems: automotive, aviation & rail. – 2008. ●

Координаты авторов: Лёвин Б. А. – [tu@miit.ru](mailto:tu@miit.ru), Цветков В. Я. – [cvj2@mail.ru](mailto:cvj2@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 28.11.2017, принята к публикации 21.03.2018.