

А.М. КАШЕВНИК, А.В. ПОНОМАРЕВ, С.В. САВОСИН  
**УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ**

---

*Кашевник А.М., Пономарев А.В., Савосин С.В. Управление гибридными системами на основе технологии интеллектуальных пространств.*

**Аннотация.** В статье предложен подход к организации управления гибридными системами на основе технологии интеллектуальных пространств. Предложенный подход обладает двумя основными характеристиками, во-первых, управление гибридной системой децентрализовано и различные функции управления выполняются различными сервисами, взаимодействующими через онтолого-ориентированное интеллектуальное пространство; во-вторых, сами сервисы описываются с помощью формализма гибридных автоматов, что позволяет использовать аппарат модельно-управляемой разработки для создания гибридных систем управления. Рассмотрен сценарий взаимодействия различных физических устройств на примере системы «умный дом».

**Ключевые слова:** интеллектуальное пространство, гибридные системы, гибридный автомат, умный дом.

*Kashevnik A.M., Ponomarev A.V., Savosin S.V. Hybrid Systems Control Based on Smart Space Technology.*

**Abstract.** The paper presents an approach to hybrid systems control based on smart space technology. The approach proposed bears two primary distinctive features: first, hybrid system control is decentralized and various control functions are implemented in separate services, communicating via ontology-based smart space; second, the services are represented by a hybrid automata formalism allowing to employ a model-driven development for hybrid control systems. The approach is illustrated by practical communication scenario of several physical devices in the context of smart home environment.

**Keywords:** smart space, hybrid systems, hybrid automata, smart home.

---

**1. Введение.** Интеллектуальное пространство – интегрированное окружение, включающее вычислительные устройства, сенсоры и, возможно, исполнительные устройства, реализующее некоторую модель рассуждений о свойствах физического пространства и пользователя – физическом и пользовательском контексте – для прозрачного предоставления пользователю различных сервисов [1].

Интеллектуальные пространства находят широкое применение при создании систем класса «умный дом» («умный автомобиль», «умный зал», «умный город») [2-5]. Одной из особенностей такого класса систем является взаимодействие вычислительных устройств с физическими объектами, характеристики которых могут быть как дискретными, так и непрерывными, и, в том числе, обладать непрерывной динамикой. В некоторых сценариях оказывается достаточно дискретной модели такого физического объекта (свет может быть включен или выключен), в более общем случае, совокупность вычислительных устройств интеллектуального пространства и физической среды является

«гибридной системой», то есть системой, обладающей как дискретной, так и непрерывной динамикой.

Понятие «гибридная система» является удобным обобщением, предоставляющим понятийный и формальный аппарат для описания и моделирования широкого спектра задач в различных инженерных приложениях [4, 5]:

- в механических системах: движение объектов, прерываемое их столкновениями;

- в электрических цепях: непрерывные процессы, такие, например, как зарядка конденсаторов, прерываемые включением и выключением тока в цепи;

- в химической промышленности: непрерывный ход химической реакции, управляемый дискретным состоянием клапанов и насосов;

- во встроенных вычислительных системах: цифровой (следовательно, дискретный) компьютер, взаимодействующий с преимущественно аналоговым окружением.

Исследования в области формализации и анализа гибридных систем показали, что одним из самых популярных подходов к описанию поведения элементов в таких системах является гибридный автомат. Гибридный автомат – это направленный граф, каждому узлу которого приписана динамическая система, а дугам – условия перехода между узлами. В качестве узла может также выступать гибридный автомат.

В целом, авторами развивается подход к созданию киберфизических систем, основанный на а) обмене информацией через онтологически ориентированное интеллектуальное пространство; б) разработке/верификации отдельных сервисов интеллектуального пространства на базе формализма гибридных автоматов. Использование онтологического описания для взаимодействующих сервисов позволяет осуществлять поддержку их интероперабельности. Описание элементов системы с помощью гибридных автоматов позволяет формализовать их поведение, осуществлять автоматическую генерацию программного кода элементов, а также осуществлять верификацию функционирования элементов (устойчивость, безопасность), то есть, реализовать концепцию разработки, управляемой моделями (Model-Driven Development) применительно к распределенным киберфизическим системам, функционирующим на основе интеллектуальных пространств.

В настоящей работе на примере сценария взаимодействия различных устройств умного дома рассмотрена организация взаимодействия сервисов интеллектуального пространства. Каждое из устройств

описывается сервисом в интеллектуальном пространстве. Применение гибридного автомата, описывающего поведение интеллектуальной системы освещения, позволило формализовать поведение системы освещения в зависимости от тех или иных изменений в интеллектуальном пространстве.

**2. Состояние исследований в области описания и анализа гибридных систем.** Широкое распространение и повышенные требования к безопасности систем, обладающих дискретно-непрерывной динамикой (то есть, гибридных), стали причиной активных исследований в области формальных методов описания, анализа и верификации таких систем. Основными направлениями исследований в этой области являются: создание логических и вычислительных моделей и методов, разработка средств компьютерной поддержки формальной спецификации и верификации требований к производительности и безопасности гибридных систем, разработка и синтез корректных (относительно формальных спецификаций) управляющих программ для гибридных систем [4].

Первым шагом для достижения любой из этих целей является создание формального языка, позволяющего:

а) описывать различные типы непрерывных и дискретных процессов, различные способы влияния дискретной динамики на изменение непрерывных переменных, создавать недетерминированные модели и т.д.;

б) строить сложные модели объединением простых;

в) описывать системы на различных уровнях абстракции, начиная от общих моделей всей системы в целом, заканчивая их конкретизацией для отдельных составляющих.

На настоящий момент предложено значительное количество методов и средств для формального описания и анализа гибридных систем. В основном, эти средства базируются на автоматном подходе, то есть, описании гибридной системы посредством гибридного автомата [7]. Основным достоинством этого подхода является то, что полученный гибридный автомат может быть использован как для анализа системы с помощью методов имитационного моделирования, так и для анализа с помощью специальных методов теории гибридных автоматов.

Языки и системы формального описания гибридных систем с помощью гибридных автоматов можно разделить на две основные группы: предназначенные, в первую очередь, для исследования поведения гибридной системы средствами имитационного моделирования и предназначенные для исследования поведения с помощью специальных аналитических методов (алгебры процессов и т.п.).

К первой группе относятся системы (и используемые в них языки) SHIFT [8], CHARON [9], R-Charon [10], Modelyze [12], Apricot [13], AnyLogic [14], HyDySS (позднее, EnviCon) [15, 16]. Предлагая имитационное моделирование в качестве основного способа исследования модели гибридной системы, эти системы отличаются функциями и специализацией. Так, R-Charon, являясь развитием CHARON, поддерживает моделирование реконфигурируемых систем, Modelyze и Apricot представляют собой результат конвергенции технологий моделирования гибридных систем и технологий создания предметно-ориентированных языков (Domain Specific Language, DSL), в AnyLogic сочетается (в том числе, в рамках одной модели) сразу несколько подходов к моделированию, а в EnviCon модель гибридного автомата уточняется применением логического подхода и продукционных правил.

Ко второй группе относятся системы  $d/dt$  [17], Massacio [11].

В настоящей работе для формального описания гибридных систем также используется модель гибридного автомата, являющаяся расширением конечного автомата, адаптированным для описания гибридных систем. Описание модели гибридного автомата приведено в системе обозначений, предложенной в [18]. В литературе [20, 7] предложено еще несколько модификаций этого описания.

Гибридный автомат  $H$  – это набор  $H = (Q, X, f, Init, Dom, E, G, R)$ , где:

$Q$  – множество дискретных состояний;

$X \subseteq \mathbb{R}^n$  – множество непрерывных состояний;

$f: Q \times X \rightarrow \mathbb{R}^n$  – векторное поле, описывающее динамику изменения непрерывных переменных автомата;

$Init \subseteq Q \times X$  – множество начальных состояний;

$Dom: Q \rightarrow P^X$  – область допустимых значений непрерывных переменных автомата для каждого из дискретных состояний;

$E \subseteq Q \times Q$  – множество дуг-переходов между дискретными состояниями;

$G: E \rightarrow P^X$  – условия перехода по соответствующей дуге между парой дискретных состояний;

$R: E \times X \rightarrow P^X$  – функция сброса, определяющая изменение значений непрерывных переменных автомата при переходе по соответствующей дуге между парой дискретных состояний.

Гибридный автомат начинает работу в состоянии  $(q_0, x_0) \in Init$ , непрерывное состояние изменяется в соответствии с дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(q_0, x), \\ x(0) &= x_0, \end{aligned}$$

а дискретное состояние  $q$  остается постоянным ( $q_0$ ).

Процесс продолжается до тех пор, пока  $x$  принадлежит множеству  $Dom(q_0)$ . Если в какой-то момент времени непрерывное состояние достигает значения  $G(q_0, q_1)$  некоторой дуги  $(q_0, q_1) \in E$ , то дискретное состояние может изменить значение на  $q_1$ . При переходе непрерывное состояние сбрасывается до значения  $R(q_0, q_1)$ . После осуществления перехода продолжается изменение непрерывного состояния и так далее.

**3. Онтолого-ориентированные модели устройств системы «умный дом» в интеллектуальном пространстве.** Рассмотрим пример взаимодействия устройств умного дома для сценария уборки помещения. Среди таких устройств в рамках рассматриваемого примера можно выделить робот-пылесос, позволяющий строить карту помещения с использованием светочувствительных датчиков и осуществлять уборку с учетом этой карты (например, Yujin Robot iClebo Arte YCR-M05) и систему управления освещением – «умный свет», позволяющую изменять интенсивность освещения в помещении в зависимости от текущей ситуации.

Каждое устройство умного дома описывается онтологией, которая формализует основные его возможности и ограничения работы. На рисунке 1 показана онтология робота-пылесоса. В онтологии выделены три класса верхнего уровня: сенсоры робота (Sensors), освещенность помещения (Lightness) и операции, выполняемые роботом (Operation). Освещенность помещения согласно онтологии робота-пылесоса может быть двух типов: достаточная для работы его бесконтактных сенсоров (класс Light) и недостаточная (класс Dark). Сенсоры могут быть контактными (класс ContactSensor) и бесконтактными (класс VideoSensor). Контактные сенсоры функционируют при любой освещенности помещения, в то время как бесконтактные требуют наличия достаточной освещенности в помещении. Операции, выполняемые роботом-пылесосом являются: всасывание (класс Cleaning) и перемещение (класс Movement). Причем перемещение может быть случайным (класс Random) с использованием только контактных сенсоров при касании стен или других объектов помещения, так и организованным (класс Organized), требующим работы как контактных, так и бесконтактных сенсоров для планирования перемещения робота по помещению. С помощью непрерывной линии на рисунке изображены таксономические отношения, а с помощью пунктирной – ассоциативные отношения, определяющие необходимость существования одного класса в зависимости от существования другого.

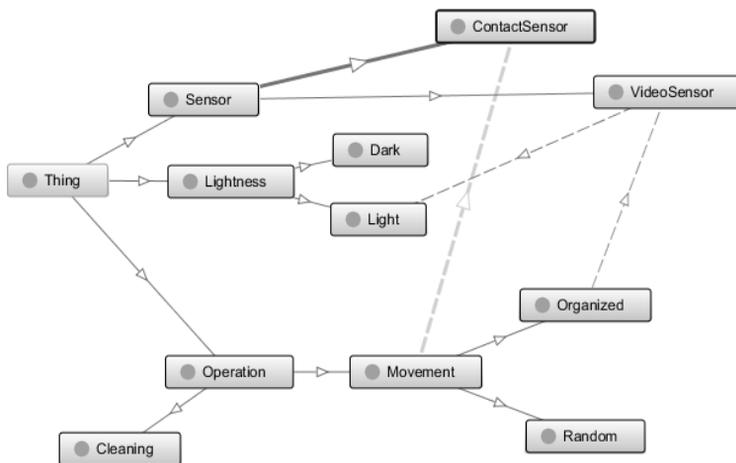


Рис. 1. Онтология робота-пылесоса

Онтология системы умный свет, отвечающей за управление искусственным освещением в помещении, состоит из класса Sensors, который включает в себя сенсор освещенности помещения (класс LightnessLevel) и класса Operation, который включает в себя регулятор искусственного освещения в помещении (класс LightControl).

Для эффективной уборки помещения роботу-пылесосу необходима достаточная его освещенность для построения карты и упорядоченного перемещения по помещению. Информация о необходимом уровне освещенности публикуется роботом в интеллектуальном пространстве и становится доступной для системы управления освещением. Таким образом, если уборка запланирована на темное время суток, система управления освещением автоматически обеспечит требуемый уровень освещенности путем включения искусственных источников света.

При наступлении события «начало уборки помещения» сервис интеллектуального пространства, представляющий робота, переходит в состояние «подготовка к уборке». В этом состоянии он публикует в интеллектуальном пространстве информацию о необходимых условиях для начала уборки помещения. В простейшей модели рассмотрим условие необходимости освещенности помещения не ниже 300 люкс, которое необходимо для работы камеры, по которой робот строит карту помещения.

Сервис интеллектуального пространства, взаимодействующий с физической системой управления освещением, получает уведомления

о необходимости контроля уровня освещения и считывает показания с датчика освещенности. В случае, если уровня освещения недостаточно (менее чем 300 люкс), сервис переходит в состояние включения освещения.

**4. Взаимодействие сервисов интеллектуального пространства при управлении гибридными системами.** В качестве базовой платформы организации интеллектуальных пространств в данной статье рассматривается платформа Smart-M3 [21, 22]. Ядро платформы подразделяется на 2 элемента: СИБ (семантический информационный брокер, Semantic Information Broker — SIB) и физическое хранилище данных. СИБ предоставляет доступ информационным агентам к информационному пространству, обеспечивая их функциями обработки информации, такими как вставка, извлечение, редактирование, удаление и подписки на изменение информации в интеллектуальном пространстве. В хранилище данных вся информация сохраняется как граф, удовлетворяющий требованиям стандарта RDF (*Resource Description Framework*) [23], описывающего семантические сети, в которых узлы и дуги имеют унифицированные идентификаторы ресурсов. Обмен информацией в интеллектуальных пространствах, построенных на базе платформы Smart-M3, осуществляется посредством публикации RDF-троек в общедоступное хранилище. Единственным способом организации потока управления, охватывающего несколько информационных агентов, является операция подписки, когда информационный агент получает оповещения при изменении выбранного фрагмента RDF-графа, содержащегося в хранилище [24].

Взаимодействие устройств умного дома осуществляется в интеллектуальном пространстве на уровне описывающих их сервисов, в то время как сами они функционируют в физическом пространстве умного дома (см. рисунок 2). Каждое устройство умного дома описывается онтологией, а его поведение гибридным автоматом. Использование онтологий позволяет обеспечить поддержку интероперабельности различных устройств интеллектуального пространства (за счёт формальной спецификации семантики используемых интерфейсов и развитых технологий автоматического и автоматизированного выравнивания онтологий, например [25]) и их синхронного поведения, в то время как описание поведения каждого устройства гибридным автоматом позволяет формализовать такое поведение и предоставляет возможности для верификации поведения устройств интеллектуального пространства.

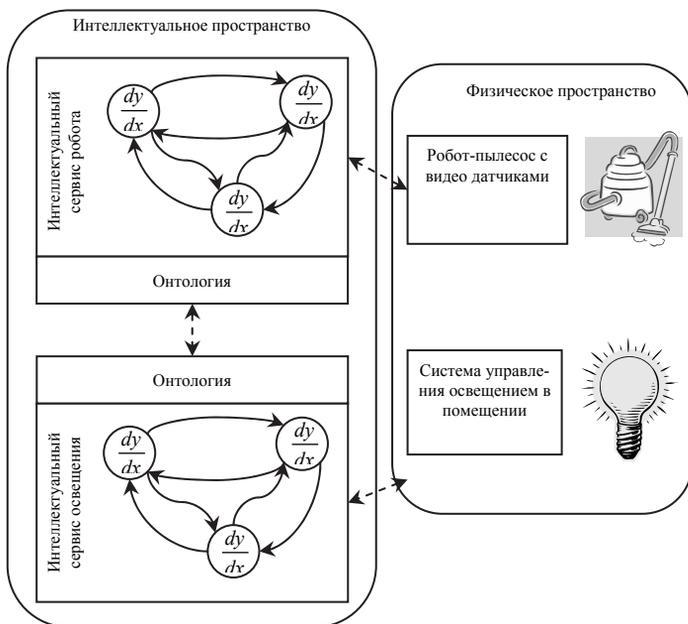


Рис. 2. Информационная модель взаимодействия сервисов на базе интеллектуального пространства с возможностью описания поведения с помощью гибридного автомата на примере робота-пылесоса и системы управления освещением

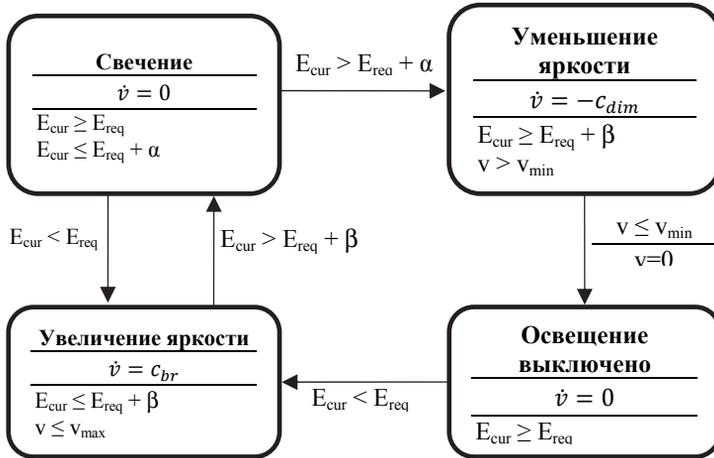
Рассмотрим ситуацию, при которой в комнате находится пользователь и его мобильное устройство, которое взаимодействует через интеллектуальное пространство с системой управления освещением в помещении для обеспечения, предпочитаемого для него уровня освещения. Мобильное устройство, обладая информацией о том, что пользователь в данный момент времени спит, публикует в интеллектуальном пространстве информацию о комфортном для пользователя на текущий момент уровне освещения.

При активации работы некоторого сервиса в интеллектуальном пространстве (например, робота-пылесоса), он публикует свои ограничения в интеллектуальном пространстве (в данном случае, необходимость обеспечения требуемого уровня освещения) в терминах своей онтологии.

Система управления освещением должна распознать конфликт между мобильным устройством пользователя и роботом-пылесосом и отдать предпочтение мобильному устройству (оставив освещение помещения на прежнем уровне), а робот-пылесос должен распознать эту

ситуацию и запланировать уборку помещения на более позднее время, а в данный момент убрать другое помещение.

На рисунке 3 показан пример гибридного автомата для описания системы управления освещением в помещении. Автомат состоит из четырех состояний: свечение, уменьшение яркости, увеличение яркости, освещение выключено. Каждое из этих состояний описывается дифференциальным уравнением, а переходы между состояниями осуществляются при достижении определенных условий.



$E_{cur}$  – текущий уровень освещения,  
 $E_{req}$  – требуемый уровень освещения,  
 $\alpha, \beta$  – константы предотвращающие частые переходы между состояниями автомата,  
 $v$  – напряжение на осветительном приборе,  
 $c_{dim}$  – интенсивность уменьшения освещения,  
 $c_{br}$  – интенсивность увеличения освещения.

Рис. 3. Пример гибридного автомата, описывающий поведение системы «Умный свет»

Например, система управления освещением находится в состоянии «освещение выключено» при текущем уровне освещения ( $E_{cur}$ ) большим, чем требуемый уровень ( $E_{req}$ ). При текущем уровне освещения меньшим, чем требуемый гибридный автомат переходит в состояние «увеличение яркости».

**6. Заключение.** В статье описан подход к управлению гибридными системами на основе технологии интеллектуальных пространств. В качестве примера использован сценарий взаимодействия устройств

при решении задачи уборки помещения в рамках системы «умный дом». Развиваемый подход обладает двумя основными характеристиками, во-первых, управление гибридной системой децентрализовано и различные функции управления выполняются различными сервисами, для обеспечения расширяемости и интероперабельности используется онтолого-ориентированное интеллектуальное пространство, посредством которого происходит взаимодействие сервисов; во-вторых, сами сервисы описываются с помощью формализма гибридных автоматов, что позволяет использовать аппарат модельно-управляемой разработки для создания гибридных систем управления, то есть, на основе модели решать как задачи генерации программного кода сервисов, так и задачи формальной верификации и оценки устойчивости и безопасности создаваемой системы управления.

В статье приведен сценарий взаимодействия различных физических устройств на примере системы «умный дом», а также приведен пример гибридного автомата, описывающего один из сервисов системы.

### Литература

1. *Lupiana D., O'Driscoll C., Mtenzi F.* Defining Smart Space in the Context of Ubiquitous Computing // Ubiquitous Computing and Communication Journal. Special Issue on ICIT 2009 conference – Web and Agent Systems. 2009. URL: [http://www.ubiccc.org/files/pdf/3\\_379.pdf](http://www.ubiccc.org/files/pdf/3_379.pdf) (дата обращения: 04.08.2014).
2. *Carreira P., Resendes S., Santos A.* Towards automatic conflict detection in home and building automation systems // Pervasive and Mobile Computing. 2014. vol. 12. pp. 37–57.
3. *Belley C., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A.* An efficient and inexpensive method for activity recognition within a smart home based on load signatures of appliances // Pervasive and Mobile Computing. 2014. vol. 12. pp. 58–78.
4. *Юсупов Р.М., Ронжин А.Л.* От умных приборов к интеллектуальному пространству // Вестник Российской Академии Наук. 2010. Том 80. Вып. 1. С. 45–51.
5. *Ронжин Ал.Л., Карпов А.А.* Сравнительный анализ функциональности прототипов интеллектуальных пространств // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 1(24). С. 277–290.
6. *Davoren J.M., Nerode A.* Logics for hybrid systems // Proceedings of the IEEE. 2000. vol. 88. issue 7. pp. 985–1010.
7. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach. ISBN 978-0-557-70857-4. 2011. URL: <http://LeeSeshia.org> (дата обращения 04.08.2014).
8. *Henzinger T.A.* The Theory of Hybrid Automata // Eleventh Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science. 1996. pp. 278–292.
9. *Deshpande A., Göllü A., Semenzato L.* The SHIFT Programming Language and Runtime System for Dynamic Networks of Hybrid Automata // IEEE Transactions on Automatic Control. 1998. vol. 43. issue 4. pp. 584–587.
10. *Alur R., Grosu R., Hur Y., Kumar V., Lee L., Lee I.* Modular Specification of Hybrid Systems in CHARON // Proceedings of the 3rd International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. 2000. pp. 6–19.

11. *Kratz F., Sokolsky O., Lee I.* R-Charon: a modeling language for reconfigurable hybrid systems // *Hybrid Systems: Computation and Control*. LNCS 3927. 2006. pp. 392–406.
12. *Henzinger T.A.* Masaccio: A formal model for embedded components // *Proceedings of the First IFIP International Conference on Theoretical Computer Science*. LNCS 1872. 2000. pp. 549–563.
13. *Broman D., Siek J.G.* Modelyze: a Gradually Typed Host Language for Embedding Equation-Based Modeling Languages // *Technical Report No. UCB/Eecs-2012-173*. 2012. p. 52.
14. *Fang H., Zhu H., Shi J.* Apricot – An Object-Oriented Modeling Language for Hybrid Systems. URL: <http://arxiv.org/pdf/1304.6498v1.pdf> (дата обращения: 04.08.2014).
15. Сайт компании AnyLogic Company. URL: <http://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 04.08.2014).
16. *Шнаков В. М.* Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // *Сборник докладов конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика»*. Санкт-Петербург. 19 – 21 октября 2005. Т. 2. С. 292–295.
17. *Шнаков В.М.* Об использовании трансформационных правил для компьютерной реализации непрерывных процессов // *Труды СПИИРАН*. 2014. Вып. 33. С. 99–116.
18. *Asarin E., Dang T., Maler O.* The d/dt tool for Verification of Hybrid Systems // *Computer Aided Verification*. 2002. vol. 2404. pp. 365–370.
19. *Lygeros J., Johansson K.H., Simic S.N., Zhang J., Sastry S.S.* Dynamical Properties of Hybrid Automata // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2003 vol. 48. no. 1. pp. 2–17.
20. *Lynch N., Segala R., Vaandrager F., Weinberg H.B.* Hybrid I/O Automata // *In Hybrid Systems III*. Springer Verlag. LNCS 1066. 1996. pp. 496–510.
21. *Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O.* Smart-M3 Information Sharing Platform // *Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC'10)*. 2010. pp. 1041–1046.
22. *Korzun D.G., Balandin S.I., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A.V.* Overview of Smart-M3 Principles for Application Development // *Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11)*, Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow: Phymathlit. 2011. vol. 4. pp. 64–71.
23. Resource Description Framework (RDF). URL: <http://www.w3.org/RDF>.
24. *Ломов А.А., Корзун Д.Ж.* Операция подписки для приложений в интеллектуальных пространствах платформы Smart-M3 // *Труды СПИИРАН*. 2012. Вып. 4(23). С. 439–458.
25. *Balandin S., Boldyrev S., Oliver I. J., Turenko T., Smirnov A.V., Shilov N. G., Kashevnik A. M.* Method and apparatus for ontology matching // *US Patent 2012/0078595 A1*. 2012.

## References

1. Lupiana D., O'Driscoll C., Mtenzi F. Defining Smart Space in the Context of Ubiquitous Computing. *Ubiquitous Computing and Communication Journal*. Special Issue on ICIT 2009 conference – Web and Agent Systems, 2009. Available at: [http://www.ubic.org/files/pdf/3\\_379.pdf](http://www.ubic.org/files/pdf/3_379.pdf) (accessed 04.08.2014).
2. Carreira P., Resendes S., Santos A. Towards automatic conflict detection in home and building automation systems. *Pervasive and Mobile Computing*. 2014. vol. 12. pp. 37–57.
3. Belley C., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A., An efficient and inexpensive method for activity recognition within a smart home based on load signatures of appliances. *Pervasive and Mobile Computing*. 2014. vol. 12. pp. 58–78.

4. Yusupov R.M., Ronzhin A.L. [From smart devices to smart space]. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk – Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2010. vol. 80. no. 1. pp. 63–68. (In Russ.).
5. Ronzhin A.L., Karpov A.A. [A comparative analysis of smart space prototypes functionality]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 1(24). pp. 277-290. (In Russ.).
6. Davoren J.M., Nerode A. Logics for hybrid systems. *Proceedings of the IEEE*. 2000. vol. 88. Issue 7. pp. 985–1010.
7. Lee E.A., Seshia S.A. *Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach*. ISBN 978-0-557-70857-4. 2011. Available at: <http://LeeSeshia.org>.
8. Henzinger, T.A. *The Theory of Hybrid Automata*. Eleventh Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science. 1996. pp. 278–292.
9. Deshpande A., Göllü A., Semenzato L. The SHIFT Programming Language and Runtime System for Dynamic Networks of Hybrid Automata, *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1998. vol. 43. issue 4. pp. 584–587.
10. Alur R., Grosu R., Hur Y., Kumar V., Lee L., Lee I. Modular Specification of Hybrid Systems in CHARON. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*. 2000, pp. 6–19.
11. Kratz F., Sokolsky O., Lee I. R-Charon: a modeling language for reconfigurable hybrid systems. *Hybrid Systems: Computation and Control*. LNCS 3927. 2006, pp. 392–406.
12. Henzinger T.A. Masaccio: A formal model for embedded components, *Proceedings of the First IFIP International Conference on Theoretical Computer Science*, LNCS 1872. 2000, pp. 549–563.
13. Broman D., Siek J.G. Modelyze: a Gradually Typed Host Language for Embedding Equation-Based Modeling Languages. *Technical Report No. UCB/EECS-2012-173*. 2012. p. 52.
14. Fang H., Zhu H., Shi J. Apricot – An Object-Oriented Modeling Language for Hybrid Systems. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1304.6498v1.pdf> (accessed 04.08.2014).
15. Sajt kompanii AnyLogic Company [AnyLogic Company Official Website]. Available at: <http://www.anylogic.ru/> (accessed 04.08.2014).
16. Shpakov V.M. [Prototype Environment for Modeling Collections of Communicating Processes]. *Sbornik dokladov konferentsii «Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika» – Proceedings of “Simulation. Theory and Practice” conference*. Sankt-Peterburg. 2005. vol. 2. pp. 292–295. (In Russ.).
17. Shpakov V.M. [On Using Transformation Rules for Computer Implementation of Continuous Processes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 33. pp. 99–116. (In Russ.).
18. Asarin E., Dang T., Maler O. The d/dt tool for Verification of Hybrid Systems. *Computer Aided Verification*. vol. 2404. 2002. pp. 365-370.
19. Lygeros J., Johansson K.H., Simic S.N., Zhang J., Sastry S.S. Dynamical Properties of Hybrid Automata. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2003. vol. 48. no. 1. pp. 2–17.
20. Lynch N., Segala R., Vaandrager F., Weinberg H.B. Hybrid I/O Automata. In *Hybrid Systems III*. Springer Verlag. LNCS 1066. 1996. pp. 496–510.
21. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O. Smart-M3 Information Sharing Platform. *Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC'10)*. 2010. pp. 1041-1046.
22. Korzun D.G., Balandin S.I., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A.V. Overview of Smart-M3 Principles for Application Development // *Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11)*. Moscow: Phymathlit. 2011. vol. 4. p. 64-71.
23. Resource Description Framework (RDF). Available at: <http://www.w3.org/RDF>.

24. Lomov A.A., Korzun D.G. [Subscription operation for applications in smart spaces of Smart-M3 platform]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. vol. 4(23). pp. 439-458. (In Russ.).
25. Balandin S., Boldyrev S., Oliver I. J., Turenko T., Smirnov A.V., Shilov N. G., Kashevnik A.M. Method and apparatus for ontology matching // US Patent 2012/0078595 A1. 2012.

**Кашевник Алексей Михайлович** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: управление знаниями, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства, логистические системы. Число научных публикаций — 85. alexey@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; p.т. +7(812)328-8071, факс +7(812)328-0685.

**Kashevnik Alexey Mihajlovich** — Ph.D., senior researcher at Computer Aided Integrated Systems laboratory of St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research area: knowledge management, profiling, ontologies, smart-spaces, logistics systems. Number of publications — 85. alexey@iias.spb.su; SPIIRAS, 14th Line V.O., 39, Saint-Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-8071, fax +7(812)328-0685.

**Пономарев Андрей Васильевич** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: рекомендуемые системы, системы персонализации, технологии баз данных, дискретная оптимизация. Число научных публикаций — 18. ponomarev@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; p.т. +7(812)328-8071, факс +7(812)328-4450.

**Ponomarev Andrew Vasil'evich** — Ph.D, senior researcher at Computer Aided Integrated Systems laboratory of St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: recommender systems, personalization, database technologies, discrete optimization. The number of publications — 18. ponomarev@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-8071, fax +7(812)328-4450.

**Савосин Сергей Валентинович** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления С.-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»). Область научных интересов: автоматизированные системы управления, геоинформационные системы. Число научных публикаций — 11. SVSavosin@iias.spb.su; СПбГЭТУ, ул. Проф. Попова д. 5, г. Санкт-Петербург, 197376, РФ; p.т. +7(812)234-2773, факс +7(812)234-2773.

**Savosin Sergey Valentinovich** — Ph.D., associate professor, associate professor at Automated Systems of Information Processing and Control department of St.Petersburg Electrotechnical University “LETI” (SPb ETU). Research interests: automated systems, GIS. The number of publications — 11. SVSavosin@iias.spb.su; SPb ETU, ul. Prof. Popova, 5, St. Petersburg, 197376, Russia; office phone +7(812)234-2773, fax +7(812)234-2773.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-07-00363-а, 14-07-00378-а, 13-07-00039-а, 13-07-00336-а).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grants # 14-07-00363-a, # 14-07-00378-a, # 13-07-00039-a, # 13-07-00336-a).

## РЕФЕРАТ

### *Кашевник А.М., Пономарев А.В., Савосин С.В.* **Управление гибридными системами на основе технологии интеллектуальных пространств.**

Интеллектуальные пространства находят широкое применение при создании систем класса «умный дом» («умный автомобиль», «умный зал», «умный город»). Одной из особенностей такого класса систем является взаимодействие вычислительных устройств с физическими объектами, характеристики которых могут быть как дискретными, так и непрерывными, и, в том числе, обладать непрерывной динамикой. В общем случае, совокупность вычислительных устройств интеллектуального пространства и физической среды является «гибридной системой», то есть системой, обладающей как дискретной, так и непрерывной динамикой.

Авторами развивается подход к созданию киберфизических систем, основанный на а) обмене информацией через онтолого-ориентированное интеллектуальное пространство; б) разработке/верификации отдельных сервисов интеллектуального пространства на базе формализма гибридных автоматов.

Использование онтологического описания для взаимодействующих сервисов позволяет осуществлять поддержку их интероперабельности, в том числе, за счёт технологий выравнивания онтологий. Описание элементов системы с помощью гибридных автоматов позволяет формализовать их поведение, осуществлять автоматическую генерацию программного кода элементов, а также осуществлять верификацию функционирования элементов (устойчивость, безопасность), то есть, реализовать концепцию разработки, управляемой моделями (Model-Driven Development) применительно к распределенным киберфизическим системам, функционирующим на основе интеллектуальных пространств.

В статье приведен сценарий взаимодействия различных физических устройств на примере системы «умный дом», а также приведен пример гибридного автомата, описывающего один из сервисов системы.

## SUMMARY

### *Kashevnik A.M., Ponomarev A.V., Savosin S.V.* **Hybrid Systems Control Based on Smart Space Technology.**

Smart spaces have become extensively used in variety of applications, especially of “smart home” class (“smart car”, “smart room”, “smart city”). One of the prominent features of this class of systems is communication between computer devices and physical devices. The latter can be described by both discrete and continuous characteristics, and have continuous dynamics. Generally, a set of computer devices of smart space together with physical devices can be described as a hybrid system, i.e. a system that possess both discrete and continuous dynamics.

Authors of this paper propose an approach to the development of cyberphysical systems, based on a) information interchange via ontology-based smart space; b) development/verification of different smart space services on the basis of hybrid automata apparatus.

Ontological description of communicating smart space services allows to support their interoperability, e.g., with the help of ontology alignment and ontology matching techniques.

The usage of hybrid automata apparatus for smart space service description allows to formalize their behavior, but even more importantly, it allows to implement automatic service code generation and verification service functioning (stability, reachability of some particular state), in other words, it allows to apply a model driven development approach to the distributed cyberphysical systems, functioning based on smart spaces.

The paper also describes an interaction scenario of several devices in a smart home environment. An example of a hybrid automata describing one of the services is also provided.