ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 004.82:003.6 DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-7-21

Умный город как сложная адаптивная система

Г. Ржевский[1], С.С. Кожевников[2], М. Свитек[3]

[1] *Открытый университет, Милтон-Кинс и Digital Ecosystems Ltd, Лондон, Великобритания*
[2] *Чешский институт информатики, робототехники и кибернетики, Чешский технический университет, Прага, Чехия*
[3] *Факультет транспортных наук, Чешский технический университет, Прага, Чехия*

Аннотация

В городской среде стремительное развитие политической, социальной и экономической сфер ставят перед лицом общественности новые задачи, актуальным решением которых является переход от традиционных методов управления городским пространством к Умному городу. При этом, необходимо переосмысление ключевых элементов данной концепции. В работе предложено обновлённое определение Умного города. Дан анализ проблем развития городских агломераций, связанных с повсеместным использованием сложной системы Интернет-экономики, и описано их практическое решение – разработка городских пространств как сложных адаптивных систем, способных предоставлять в реальном времени услуги горожанам и приезжим в зависимости от уровня сложности задачи. Авторы выступают за применение инновационного подхода, который обеспечивает минимальное количество вмешательств в работу городских служб. Концепция синхронной разработки и внедрения мультиагентных систем планирования сервисов в реальном времени и онтологии Умного города, описанные в статье, позволят обеспечить необходимые изменения за счёт параллельной работы географически распределённых проектных групп.

Ключевые слова: *Умный город, сложная адаптивная система, городская экосистема, самоорганизация, ко-эволюция.*

Цитирование: *Ржевский, Г.* Умный город как сложная адаптивная система / Г. Ржевский, С.С. Кожевников, М. Свитек // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10, №1(35). - С.7-21. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-7-21.

Введение в концепцию Умного города

Известно большое количество работ, посвящённых концепции «Умный город». Использование современных технологий для проектирования Умного города в целях достижения синергетического эффекта между различными подсистемами (транспорт, логистика, безопасность, энергетика, административный сектор и др.) с указаниями энергоёмкости и качества жизни жителей описано в [1].

Возможность применения концепции Умного города для узконаправленных задач, таких как оптимизация энергопотребления, улучшение качества воздуха, шумоизоляция, регулирование транспортных систем, и для глобальных проектов, как, например, поддержание самобытности заданного места и его урбанистической структуры, т.е. исторического, культурного, экологического или эстетического аспектов, освещается в [2, 3]; обсуждается также возможность использования подхода в более широком смысле, а именно концепции «Умный поселок» или «Умный регион».

Умный город как сложная система рассматривается в [4, 5], где показано, что для достижения эффективного функционирования подобной системы необходима кооперация между представителями различных профессий: архитекторами, адвокатами, инвесторами, экспертами в области транспорта и энергии, сотрудниками сферы информационных технологий, политиками, социологами и др. [6].

В работе [7] обсуждается роль социальных сетей как нового средства коммуникации для эффективной взаимосвязи между различными группами населения. С использованием информации, полученной от целевой аудитории, становятся возможными корректировка поведенческих привычек и улучшение двусторонней коммуникации между представителями городского управления и жителями города [8]. Это направление особенно важно, так как каждый отдельный горожанин может влиять на жизнь города и должен обладать средствами для выражения собственного мнения.

Для управления городом уже используются различные типы датчиков, сенсоров, различные камеры, а также фотографии со спутников (для прогнозирования погоды, составления карт распределения температуры или выбросов CO - NO_x) [9]. Даже мобильный телефон сейчас, по сути, является «умным» сенсором, предоставляющим важную информацию.

Новые технологии способствуют более эффективному планированию и вовлечению жителей в развитие города. Представление различных решений проблемы может быть осуществлено с помощью современных средств визуализации, таких как виртуальная или дополненная реальность.

С технической точки зрения, Интернет вещей, Интернет людей, Интернет энергии, Промышленный Интернет вещей или Интернет услуг используются для общего обмена информацией [10, 11]. С системной точки зрения применяются киберфизические системы, или, как вариант в случае Умных городов, социокиберфизическая система [12, 13]. Благодаря возрастающему потоку данных управление городскими структурами изменяется, уходя от стандартных предопределённых динамичных планов к адаптивным алгоритмам контроля, которые обеспечивают координацию крупных территориальных единиц [14, 15].

На практике все элементы Умного города могут быть представлены Агентами Потребности (*Demand Agents*) и Агентами Ресурсов (*Resource Agents*), которые могут взаимодействовать между собой и представляют собой все существующие запросы и ресурсы [5]. Подобная холистическая модель играет роль динамичной цифровой площадки с ограниченным и изменяющимся во времени количеством ресурсов. Благодаря этому концепция Умного города со способностью быстро восстанавливаться (*Smart Resilient City 5.0*) [16] является новым взглядом на город как на цифровую платформу и экосистему умных устройств, где агенты людей, вещей, документов, роботов и других подразделений могут напрямую взаимодействовать между собой, базируясь на принципе «заказ-ресурс» и предоставляя наилучшее возможное решение. Такая платформа создаёт умное пространство, и становится основой для самоорганизации индивидуумов, групп или целых систем в условиях устойчивости или, если необходимо, адаптивности [17].

Человеческий фактор является ключевым при принятии решений. По этой причине в рамках концепции Умного города необходимо отметить человеко-машинный интерфейс как связующий элемент между техническими системами и людьми, который должен быть интуитивно понятным и лёгким для использования для всех категорий граждан (дети, пенсионеры, люди с ограниченными возможностями, и т.д.) [18]. Взаимодействие с пользователями может быть оценено с помощью различных видов симуляций для выбранной группы жителей [19].

Для оценки развития Умного города используется множество методологий, например, индекс Умного города [20]. Он включает в себя оценку уровня «оцифрованности» различных

процессов и параметров функциональности некоторых городских подсистем, таких как мобильность, безопасность, управление энергией. Основываясь на разных методологиях, ежегодная экспертиза лучших Умных городов проходит на общемировом уровне.

1 Сложные адаптивные системы

Система считается сложной в тех случаях, если она открыта (обменивается информацией с окружающим миром), состоит из множества частично автономных и связанных между собой компонентов, называемых агентами, и если в этой системе нет централизованного управления. Поведение таких систем неопределённое, но не случайное. Общее поведение складывается из связей между составными агентами. Автономность агентов ограничивается сдерживающими факторами, наложенными на них системой, к которой они принадлежат.

Термин сложная комплексная система (*complex system*) происходит от слова *complexus* (лат. переплетение или взаимосвязь) и этимологически не связан со словами сложный (*complicated*), громоздкий (как бюрократия), неуправляемый, хаотичный (как неорганизованное управление) или сложный для понимания (как документ). Так как ключевым преимуществом сложных комплексных систем является адаптивность принято называть такие системы сложными адаптивными системами [1].

Используя неопределённость в качестве критерия, можно разделить все системы на три класса (таблица 1):

- Детерминированные, где поведение системы предсказуемо (неопределённость = 0). Примеры включают в себя как объекты, созданные человеком, так и закрытые модели физических систем.
- Сложные, поведение которых определяется взаимодействием агентов, детально не предсказуемо и всё же следует некоторым закономерностям (1> неопределённость >0). Среди примеров можем выделить: социальная, политическая и экономическая системы, бизнес и рынок.
- Случайные, поведение которых полностью непредсказуемо (неопределённость = 1). Хорошим примером в данном случае может быть движение молекул.

Таблица 1 - Классификация систем

Случайные	Сложные	Детерминированные
Неопределённость = 1	1> неопределённость >0	Неопределённость = 0
Полная автономия агентов	Частичная автономия агентов	Отсутствие автономии у агентов
Неорганизованная	Самоорганизация	Организованная
Непредсказуемое поведение	Эмерджентное поведение	Предсказуемое поведение

Ключевыми параметрами, которые отличают комплексные системы от детерминированных, являются: связность, автономность, эмерджентность, нелинейность, неравновесность, самоорганизация, и ко-эволюция.

Связность агента указывает на число тех агентов, с которыми может взаимодействовать первоначальный агент. Сложность системы увеличивается вместе с увеличением связности агентов. Сила связности – важный параметр для оценки сложности системы. Комплексность тем выше, чем слабее связи между агентами и чем проще эти связи разорвать и образовать новые связи с другими агентами.

Автономность агентов указывает на степень свободы поведения агента. Сложность системы увеличивается при увеличении автономности агентов. Тем не менее, в сложных системах всегда имеется ограниченное число степеней свободы. В крайних случаях, когда агентам предоставляется полная свобода, поведение системы становится случайным.

Эмерджентность указывает на наличие у системы особых свойств, не присущих отдельным её элементам. Эти свойства появляются как следствие взаимодействия агентов.

Свойство *нелинейности* присуще системам, в которых связи между агентами не линейны и обладают амплификацией, самоускорением и автокаталитическими свойствами. В результате незначительные возмущения могут приводить к экстремальным последствиям и таким явлениям, как «Эффект бабочки». Не менее важно, что разрастание небольших возмущений во времени может вызвать эффект, известный как «Скольжение к провалу».

Неравновесность – свойство, указывающее на то, что операции подвержены влиянию непредсказуемых разрушающих событий. Если комплексность системы велика, разрушающие события генерируются с высокой частотой, и у системы нет времени, чтобы вернуться к состоянию равновесия до появления следующего события.

Самоорганизация – свойство, которое проявляется в тех случаях, когда случается разрушающее событие (поступление неожиданного запроса, отсрочка, фальсификация, атака и т.д.), и система в срочном порядке определяет поражённые участки и перестраивается для ликвидации или, по крайней мере, для снижения эффекта от воздействия разрушающего события до наступления новой атаки. Самоорганизация – важная особенность сложной системы, которая делает её адаптивной к изменениям окружающей среды и способной быстро восстанавливаться при нападениях извне. Самоорганизация может также вести к саморазвитию, в результате которого агенты самоорганизуются для улучшения работы системы.

Ко-эволюция – свойство сложных систем, которое позволяет им развиваться вместе с окружающей средой. При этом системы поддаются внешнему воздействию со стороны окружающей среды и, в свою очередь, также влияют на неё.

2 Определение понятия Умный город 5.0

Умный город – это адаптивный, способный быстро восстанавливаться и устойчивый в развитии город, который предлагает его гостям и жителям высокий уровень жизни, работы и развлечений при минимальном влиянии на окружающую среду.

Адаптивность, устойчивость в развитии и способность быстро восстанавливаться являются эмерджентными свойствами сложных адаптивных систем [1, 17]. Из этого следует, что для превращения города в умный, ему необходимо пройти через «цифровизацию», т.е. базироваться на таких цифровых технологиях как: мультиагентные системы, искусственный интеллект, Интернет вещей, социальные сети и др., а также набор необходимых сенсоров [21].

3 Проблемы современного города

Суть современных проблем в городском «пространстве» заключается в комплексной природе его политической, социальной и экономической сред, информация и процессы в которых растут экспоненциально, в то время как их административные возможности и технологическая инфраструктура остаются ограниченными. Из чего следует сложность эффективного управления городом в новых динамичных условиях [22, 23]. Результатом подобного развития событий являются недовольство жителей города, увеличение проблем со здоровьем горожан из-за загрязнения окружающей среды и бесполезной трате ресурсов.

Ключевые проблемы, которые требуют решения:

- расточительные, неорганизованные, вредные для окружающей среды услуги, которые оказываются жителям города;

- отсутствие адекватных каналов коммуникации между жителями города, гостями и городской администрацией, что не позволяет горожанам и туристам заявить об их ожиданиях;
- отсутствие мониторинга качества услуг и знаний об эффективном управлении городом в условиях комплексности;
- несовершенные методы стратегического планирования.

В типичном городе предоставляются различные типы услуг, например:

- образование,
- медицинские услуги,
- социальные услуги,
- дороги и транспорт,
- поставка продовольствия,
- водоснабжение,
- канализация,
- уборка и сбор мусора,
- развитие экономики,
- городское планирование,
- обеспечение безопасности общества,
- гигиена окружающей среды,
- туризм,
- развлечения,
- строительство,
- жилищные услуги,
- сбор налогов,
- и другие.

Каждая из этих услуг может быть улучшена при управлении ресурсами в режиме реального времени. Более качественные улучшения могут быть достигнуты за счёт координирования предоставляемых услуг с помощью цифровых технологий в тех случаях, если эти услуги находятся на открытом рынке и конкурируют между собой. На данный момент каждая жизненно важная услуга оказывается отдельно, и координация услуг практически отсутствует.

Подобный метод управления ведёт к значительной трате ресурсов, существенной угрозе состоянию окружающей среды и увеличению числа заболеваний, связанных с её загрязнением. В результате увеличивается число непредсказуемых событий, таких как изменение политики (за счёт политической нестабильности), изменений спросов на услуги (из-за потока иммигрантов, разнообразия потребностей, избыточного туризма), неудачного использования ресурсов и появления задержек (причиной которых являются несчастные случаи, перегруженный трафик, рост спроса на рынке товаров, праздники, туристические сезоны, эпидемии, террористические атаки и т.д.)

В то же время растёт осведомлённость жителей города как о проблемах окружающей среды, так и об угрозах для здоровья, результатом чего выступает фрустрация, которая, в свою очередь, становится причиной демонстраций и требований к улучшению качества жизни.

Важными факторами в секторе городского управления являются жёсткая, разделённая на множество департаментов структура, которая часто мешает эффективной координации услуг, использование традиционных информационных технологий, которые не в состоянии справляться с динамичностью городской жизни.

Проведённое исследование показало, что во многих городах не налажена эффективная система связи общества и власти. В результате представители городской администрации недостаточно хорошо осведомлены о требованиях и ожиданиях тех людей, непосредственно для которых организационные структуры и были созданы.

На данный момент ни в одном городе нет эффективной системы организации жизни, работы и развлечений в условиях непредсказуемых событий в политической, социальной и экономической сферах. Поэтому необходимо распространять знания об управлении сложными комплексными системами максимально широко.

4 Проектирование Умного города 5.0

Основная идея науки о сложных системах (*Complexity Science*) состоит в том, что только сложные адаптивные системы могут эффективно работать в условиях комплексности. Жёстко заданные структуры детерминированных систем имеют тенденцию ломаться, когда помещаются в комплексную среду – это явление в настоящее время наблюдается во многих приходящих в упадок городских хозяйствах по всему миру. В то же время сложные структуры легко приспосабливаются к изменениям, способны быстро восстанавливаться при внешних воздействиях и сосуществуют, и изменяются одновременно с внешними условиями, что делает их более устойчивыми.

Из этого следует необходимость поиска способа превратить современный город в сложную адаптивную городскую систему.

Адаптивные службы способны обнаруживать негативное событие до того, как оно причинит какой-либо ущерб, и быстро перенаправлять ресурсы, затронутые этим событием для нейтрализации или уменьшения последствий. Поскольку непредсказуемые негативные воздействия появляются довольно часто, их обнаружение и последующее перепланирование ресурсов должно выполняться быстро - в режиме реального времени, что может быть достигнуто только с помощью умной технологии принятия решений, такой как мультиагентные системы. Городские службы, как правило, взаимосвязаны, поэтому процесс адаптации в одной службе запустит волну изменений в других. Подразумевается, что службы в Умном городе будут постоянно самоорганизовываться, чтобы адаптироваться к различным событиям.

От городской системы требуется устойчивое развитие [15]. Устойчивые городские службы способны ко-эволюционировать в своей среде, что представляет собой процесс взаимодействия, в котором службы адаптируются к постоянным изменениям и среда адаптируется к постоянным изменениям в службах. Проиллюстрировать ко-эволюцию служб Умного города и среды можно на следующем примере работы городского транспорта с использованием различных типов энергоносителей.

Увеличение загрязнения от дизельного транспорта, определяемое датчиками загрязнения и специальными службами, например, подходит к критическим значениям. Умная система в таком случае предлагает повышение налогов на использование дизельных транспортных средств в городе, что, в свою очередь, ускоряет процесс перехода с дизельных автомобилей на электромобили. Система адаптивного планирования быстро улавливает тенденцию и инициирует расширение радиуса установки точек для зарядки электромобилей.

Умные города благодаря использованию мультиагентных планировщиков в реальном времени могут обладать такими свойствами, как адаптивность, способность быстро восстанавливаться и устойчивость. При этом мультиагентные планировщики способны кооперировать (или конкурировать) друг с другом, обеспечивая взаимодействие служб с целью максимизации согласованных значений показателей эффективности Умного города.

Архитектура городской службы, работающей в реальном времени, изображена на рисунке 1.

Типовая городская служба состоит из:

- Реального Мира человеческих и физических ресурсов и потребностей;
- Виртуального Мира программных агентов, занимающихся планированием ресурсов Реального Мира в реальном времени;
- базы знаний, содержащих информацию о том, как запустить сервис;
- интерфейсов между двумя мирами, в первую очередь предназначенных для передачи: информации о разрушительных событиях из Реального в Виртуальный Мир и инструкции по переносу человеческих и физических ресурсов из Виртуального в Реальный Мир.

5 Трансформация города в Умный город 5.0

В качестве примера рассмотрен типичный город, где есть орган местного самоуправления - городская администрация, ответственная за обслуживание граждан. Данная администрация решила существенно улучшить качество услуг каждой из подведомственных служб и в то же время сократить расходы на их работу.

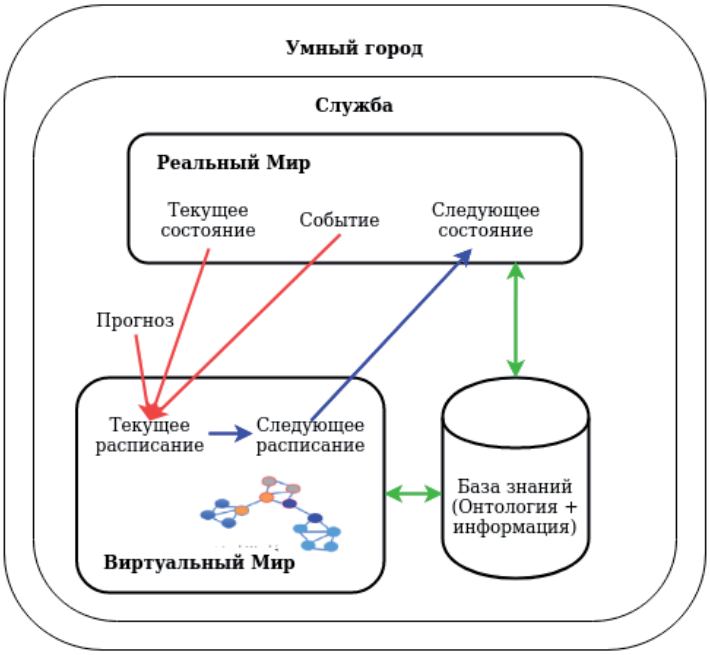


Рисунок 1 - Архитектура сервисов Умного города

5.1 Спецификация требований

Существует общепринятое мнение – подходить к решению проблемы «сверху вниз», пытаясь создать спецификацию требований для всего города ещё до начала работ. Такой подход неприемлем при нынешней динамично изменяющейся политической, социальной, экономической и технологической городской среде. Требования будут устаревать ещё до завершения их формирования. Метод эволюционной трансформации, предлагаемый авторами, может обеспечить плавное преобразование.

5.2 Эволюционный метод цифровой трансформации

В условиях часто изменяющихся требований целесообразно использовать эволюционный метод преобразований в такой последовательности действий:

1) рассмотреть все услуги города с точки зрения определения наибольшей ценности для города;
2) сформировать спецификацию требований для улучшения выбранной услуги;
3) разработать и внедрить адаптивный планировщик в реальном времени только для выбранной услуги;
4) оценить и обновить решение, демонстрирующее достигнутый прирост целевых показателей;
5) выбрать следующую услугу и повторить шаги 2, 3, 4, удостоверившись, что они кооперируют (или конкурируют) с уже имеющимися службами, которые были изменены ранее.

По мере увеличения количества претерпевших изменения услуг необходимо постоянно контролировать и вносить необходимые изменения непосредственно в Умный город.

Постепенное и непрерывное улучшение качества работы служб города никогда не должно прекращаться. Необходимо обеспечить непрерывный доступ квалифицированных специалистов для постоянного поддержания и улучшения городской экосистемы, что позволит дополнять её новыми услугами, способными к самообслуживанию и самосовершенствованию.

5.3 Режим синхронной трансформации

В дополнение к эволюционному подходу к трансформации работа над спецификациями требований, проектированием и вводом в эксплуатацию более качественно работающих служб должна проводиться синхронно, рассчитывая затрачиваемое время таким образом, чтобы всякий раз, когда:

- разработка проекта улучшения услуги завершена, спецификация требований для улучшения работы следующей услуги была готова к проектированию;
- ввод в эксплуатацию обновлённой услуги был завершён, проект для улучшения работы следующей готов к вводу в эксплуатацию.

Синхронная разработка особенно удобна, если над проектом совместно работают несколько географически распределённых команд.

6 Пример применения концепции услуги в Умном городе

В качестве примера приведена работа скорой помощи - критически важной службы города, функционирование которой при этом необходимо улучшить.

6.1 Разработка онтологии

Один из подходов к формализации знаний в концепции Умный город основан на создании онтологий. Они могут быть представлены семантическими сетями с описанием основных сущностей предметной области в виде классов, атрибутов и отношений. Это помогает отделить базы данных (БД) и код разработчиков от знаний, которые крайне важны для адаптации системы. На данный момент концепция Умного города чаще всего опирается на создание единой БД в городе для обеспечения доступа к услугам [24].

Эта задача требует формализации знаний обо всех аспектах Умного города и обеспечения простого доступа к этим знаниям для различных служб и поддержки взаимодействия на цифровых платформах и в экосистемах [25]. Модель города, основанная на онтологиях, может определять основные объекты, такие как здания, дороги, транспорт, автобусные остановки, светофоры, источники энергии, места отдыха и другие. Эти объекты могут иметь и детальное описание - здание может быть рестораном, бизнес-центром или жилым зданием со многими другими свойствами, сохранёнными в качестве атрибутов (количество этажей, дата строительства и т.д.). Онтология также может описывать людей, их деятельность или запросы, требования или бизнес-процессы [26].

Формализованные таким образом знания могут использоваться различными городскими службами не только в качестве источника необработанной информации (как сейчас), но и для адаптации к текущей ситуации и корректировки работы, обеспечения устойчивости развития города.

Применение концепции начинается с описания онтологии службы скорой помощи, которая включает в себя:

1) классы объектов (машина скорой помощи, экипаж скорой помощи, член экипажа, медицинское оборудование, маршрут, дорога, больница, пациент, родственник);
2) отношения (экипаж относится к машине скорой помощи, оборудование принадлежит экипажу, машина скорой помощи следует по маршруту);
3) свойства классов объектов (для члена экипажа: идентификатор, квалификация, доступность).

На этом этапе целесообразно написать сценарии для агентов, которые будут храниться в онтологии и будут доступны агентам, когда появится необходимость выполнить задачу.

Все политики, правила и положения, регулирующие работу служб, также должны храниться в онтологии. В дополнение к онтологии база знаний также содержит все данные об объектах, которые обычно хранятся в клиентских БД [27].

Вариант онтологии для рассматриваемого примера представлен на рисунках 2 и 3.

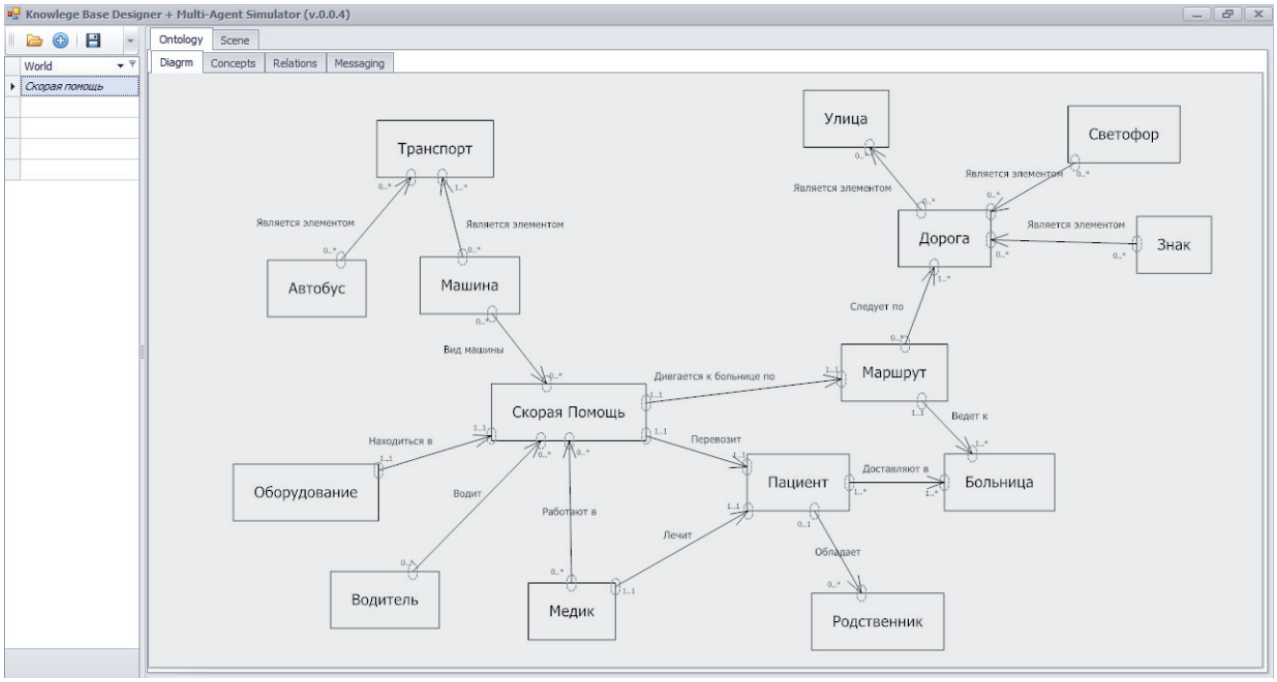
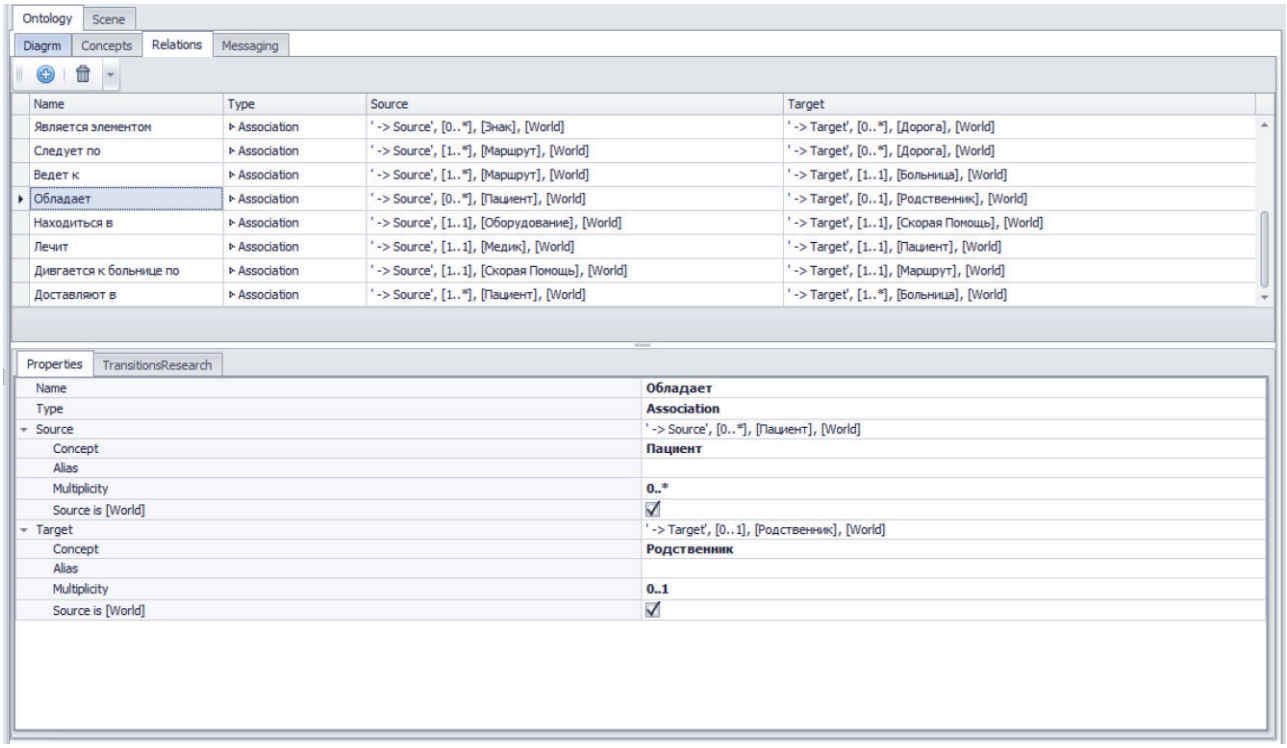


Рисунок 2 – Вариант разработанной онтологии для службы скорой помощи



Ontology | Scene

Diagrm | Concepts | Relations | Messaging

Name	Type	Source	Target
Является элементом	Association	' -> Source', [0..*], [Знак], [World]	' -> Target', [0..*], [Дорога], [World]
Следует по	Association	' -> Source', [1..*], [Маршрут], [World]	' -> Target', [0..*], [Дорога], [World]
Ведет к	Association	' -> Source', [1..*], [Маршрут], [World]	' -> Target', [1..1], [Больница], [World]
Обладает	Association	' -> Source', [0..*], [Пациент], [World]	' -> Target', [0..1], [Родственник], [World]
Находиться в	Association	' -> Source', [1..1], [Оборудование], [World]	' -> Target', [1..1], [Скорая Помощь], [World]
Лечит	Association	' -> Source', [1..1], [Медик], [World]	' -> Target', [1..1], [Пациент], [World]
Дивгается к больнице по	Association	' -> Source', [1..1], [Скорая Помощь], [World]	' -> Target', [1..1], [Маршрут], [World]
Доставляют в	Association	' -> Source', [1..*], [Пациент], [World]	' -> Target', [1..*], [Больница], [World]

Properties | TransitionsResearch

Name	**Обладает**
Type	**Association**
Source	' -> Source', [0..*], [Пациент], [World]
Concept	**Пациент**
Alias	
Multiplicity	**0..***
Source is [World]	☑
Target	' -> Target', [0..1], [Родственник], [World]
Concept	**Родственник**
Alias	
Multiplicity	**0..1**
Source is [World]	☑

Рисунок 3 – Концепты и связи разработанной онтологии

6.2 Создание Виртуального Мира

Создание Виртуального Мира означает проектирование цифровой инфраструктуры, которая поддерживает обмен информацией между агентами, число которых может доходить до сотен тысяч.

Виртуальный Мир – это место, где агенты «договариваются» между собой о том, как распределять ресурсы по запросам. Этот процесс быстрый и не повторяющийся. Условия, при которых ведутся переговоры между агентами, часто изменяются в процессе.

В Виртуальном Мире службы скорой помощи взаимодействие членов экипажа между собой или с другими экипажами скорой помощи, а также с больницами, взаимодействие дорог с маршрутами, пациентов с больницами и т.д. осуществляется путём обмена сообщениями между соответствующими агентами [28].

Адаптивность достигается путём сопоставления агентами требований к ресурсам и возможностями. Если, например, дорога в выбранную больницу заблокирована из-за интенсивного движения, агент дороги, к ней относящийся, немедленно сообщит о проблеме агентам других дорог, что инициирует волну сообщений между ними для определения нового маршрута в больницу. Если новый маршрут окажется слишком длинным, агенты могут попытаться договориться о том, чтобы конечным пунктом маршрута была другая больница.

Основным преимуществом подобного перепланирования является то, что части экосистемы службы скорой помощи, не затронутые закрытием дороги, продолжают функционировать так, как если бы не было сбоев.

Описанный пример - лишь небольшая часть процесса проектирования, но достаточен для демонстрации преимуществ мультиагентной технологии по сравнению с последовательной оптимизацией. Больше деталей можно найти в [1, 29, 30].

6.3 Проектирование интерфейсов между Реальным и Виртуальным Мирами

Информация о деструктивных событиях, происходящих в Реальном Мире, должна передаваться в Виртуальный Мир, а все решения по планированию, принимаемые агентами в Виртуальном Мире, должны передаваться в Реальный Мир.

Первоначально обмен информацией может осуществляться посредством обмена сообщениями между людьми, выступающими в роли операторов (например, водителями), с использованием их смартфонов или специально разработанных портативных устройств связи, и агентами [23, 31]. Однако наиболее предпочтительным способом является обмен информацией между физическими ресурсами Реального Мира (например, транспортными средствами, роботами, конвейерами) и агентами с использованием технологии Интернета вещей.

6.4 Расширение концепции

Планирование маршрутов машин скорой помощи легко расширяется, например, путём добавления врачей и учреждений, которые требуются пациентам, доставляемым на скорой помощи. Для этого нужны дополнительные агенты. Следующим этапом добавляются агенты для планирования использования других ресурсов больницы, таких как оборудование, операционные и т.д. Проектирование должно продвигаться шаг за шагом и каждый шаг должен проверяться на практике до того, как будет введён в работу следующий.

Заключение

Переход от города в привычном понимании к Умному городу крайне необходим из-за огромного разрыва между возросшей сложностью политической, социальной и экономиче-

ской среды современных населённых пунктов и уже устаревшей административной и технологической инфраструктурой, неспособной эффективно функционировать в новых условиях.

В статье показана необходимость переосмысления ключевых элементов и общей концепции Умного города. Представлено определение Умного города как сложной адаптивной интеллектуальной системы.

Описан метод эволюционной трансформации, который предполагает минимальное вмешательство в работу городских служб, обеспечивает плавные изменения и может выполняться несколькими командами специалистов параллельно. В настоящее время метод используется авторами в проекте, направленном на разработку Умного города 5.0 - цифровой экосистемы служб, позволяющей достичь синергетического эффекта между различными подсистемами (транспорт, экология, энергетика, городское проектирование и др.).

Список источников

[1] ***Rzevski, G.*** Managing Complexity / G. Rzevski, P. Skobelev. WIT Press, Southampton, Boston, 2014. ISBN 978-1-84564-936-4.

[2] ***Svítek, M.*** Telematic approach into program of smart cities, EATIS 2014, Valparaiso - Chile, 2014, ISBN 978-1-4503-2435-9.

[3] ***Svítek, M.*** Smart City 5.0 as an Urban Ecosystem of Smart Services / M. Svítek, P. Skobelev, S. Kozhevnikov // in Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P., Giret Boggino A., Botti V. (eds) Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. SOHOMA 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 853. Springer, Cham, 2020, p.426 – 438, ISBN 978-3-030-27476-4.

[4] ***Allam, Z.*** Redefining the Smart City: Culture, Metabolism and Governance / Z. Allam, P. Newman // Smart Cities. 1, 4 (2018)

[5] ***Kozhevnikov, S.*** Development of Resource-Demand Networks for Smart Cities 5.0 / S. Kozhevnikov, P. Skobelev, O. Pribyl, M. Svítek // in Mařík V., Kadera P., Rzevski G., Zoitl A., Anderst-Kotsis G., A Min Tjoa, Khalil I. (eds) Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. HoloMAS 2019. Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol 11710. Springer AG 2019, p.203-217, ISBN 978-3-030-27877-9.

[6] ***Batty, M.*** Smart cities of the future / M. Batty, K. Axhausen, F. Giannotti, A. Pozdnoukhov, A. Bazzani, M. Wachowicz, G. Ouzounis, Y. Portugali // The European Physical Journal Special Topics. 214, 481-518 (2012).

[7] ***Postranecky, M***. SynopCity Virtual HUB – A testbed for Smart Cities / M. Postranecky, M. Svitek, E.Z. Carrillo // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazin, Vol. 10, Issue 2, 2018, p.50-57, DOI: 10.1109/MITS.2018.2806642.

[8] ***Uribe-Pérez, N.*** A novel communication system approach for a Smart City based on the human nervous system / N. Uribe-Pérez, C. Pous // Future Generation Computer Systems. 76 (2017).

[9] ***Trucco, P.*** Ontology-based approach to disruption scenario generation for critical infrastructure systems / P. Trucco, B. Petrenj, S. Bouchon, C. Dimauro // International Journal of Critical Infrastructures. 12, 248 (2016).

[10] ***Евгенев, Г.Б.*** Индустрия 5.0 как интеграция Интернета знаний и Интернета вещей / Г.Б. Евгенев // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9, №1(31). – С.7-23. – DOI: 10.18287/2223- 9537-2019-9-1-7-23.

[11] ***Цветков, В.Я.*** Метрики сложной детерминированной системы / В.Я. Цветков, А.В. Буравцев // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, №3(25). - С. 334-346. – DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-334-346

[12] ***Микони, С.В.*** Обобщѐнная онтологическая модель управления в концепции социокиберфизической системы / С.В. Микони // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9, №2(32). – С.191-202. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-191-202.

[13] ***Максимов, Н.В.*** Семантическое ядро цифровой платформы / Н.В. Максимов, О.Л. Голицына, М.Г. Ганченкова, Д.В. Санатов, А.В. Разумов // Онтология проектирования. -2018. - Т. 8, №3(29). - С.412-426. - DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-412-426.

[14] ***Santipantakis, G.*** OBDAIR: Ontology-Based Distributed framework for Accessing, Integrating and Reasoning with data in disparate data sources / G. Santipantakis, K. Kotis, G.A. Vouros // Expert Systems with Applications. 90, 464-483 (2017).

[15] ***Costin, A.*** Need for Interoperability to Enable Seamless Information Exchanges in Smart and Sustainable Urban Systems / A. Costin, C. Eastman // Journal of Computing in Civil Engineering. 33 (2019).

[16] ***Moraci, F.*** Making Less Vulnerable Cities: Resilience as a New Paradigm of Smart Planning / F. Moraci, M. Errigo, C. Fazia, G. Burgio, S. Foresta // Sustainability. 10, 755 (2018).

[17] ***Rzevski, G.*** Intelligent Multi-Agent Platform for Designing Digital Ecosystems / G. Rzevski // In Vladimir Marik, Petr Kadera, George Rzevski, Alois Zolti, Gabriele Anderst-Kotsis, A Min Yjoa, Ismail Khalil (eds), Proceedings of the 9th International Conference, HoloMAS 2019, Linz, Austria, August 26 – 29, 2019, p.29-41. LNAI 11710.
[18] ***Ouyang, M.*** A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems / M. Ouyang // Structural Safety. 36-37, 23-31 (2012).
[19] ***Agudelo-Vera, C***. Harvesting urban resource towards more resilient cities / C. Agudelo-Vera, W.R.W.A. Leduc, A.R. Mels, H. Rijnaarts // Resources, Conservation and Recycling. 64, 3-12 (2012).
[20] Index of Smart Cities, IMD World Competitiveness Centre, Smart City Observatory, Singapore University of Technology and Design. In: https://www.imd.org/smart-city-observatory/smart-city-index.
[21] ***Ganzha, M.*** Semantic interoperability in the internet of things: An over-view from the INTER-IoT perspective / M. Ganzha, M. Paprzycki, W. Pawłowski, P. Szmeja, K. Wasielewska // J. Network Comput. 81, 111–124 (2017).
[22] ***Badii, C.*** Km4City Smart City API: An integrated support for mobility services / C. Badii, P. Bellini, D. Cenni, G. Martelli, P. Nesi, M. Paolucc // IEEE Int. Conf. on Smart Computing, 1–8 (2016).
[23] ***Городецкий, В.И.*** Цифровая платформа киберфизических систем / В.И. Городецкий, П.О. Скобелев. // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17 – 20 июня 2019 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019.
[24] ***Seedah, D.P.*** Ontology for querying heterogeneous data sources in freight transportation / D.P. Seedah, C. Choubassi, F. Leite // J. Comput. Civ. Eng. 30 (4): 04015069 (2016).
[25] ***Howsawi, A.*** An ontology to support the move towards sustainable construction in Saudi Arabia / A. Howsawi, J. Zhang // ASCE Int. Workshop on Computing in Civil Engineering, 296–303 (2017).
[26] ***Bilgin, G.*** An ontology-based approach for delay analysis in construction / G. Bilgin, I. Dikmen, M.T. Birgonul // KSCE J. Civ. Eng. 22 (2), 384–398 (2018)
[27] ***Скобелев, П.О.*** Применение онтологии в мультиагентной системе адаптивного планирования / П.О. Скобелев, А.А. Жиляев, О.И. Лахин, И.В. Майоров, Е.В. Симонова. // Труды XX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 03-06 сентября 2018 г. – Самара: ОФОРТ, 2018. – С.367-375. – ISBN 978-5-473-01200-2.
[28] ***Mustapha, K.*** Smart Cities and Resilience Plans: A Multi-Agent Based Simulation for Extreme Event Rescuing /, K. Mustapha, H. Mcheick, S. Mellouli // Dans Smarter as the new urban agenda : a comprehensive view of the 21st century city. (p. 149-170). Public Administration and Information Technology. Texas: Springe (2016).
[29] ***Massei, M.*** Simulation of an urban environment by using intelligent agents within asymmetric scenarios for assessing alternative command and control network-centric maturity models / M. Massei, A. Tremori // The Journal of Defense Modelling and Simulation: Applications, Methodology, Technology. 11, 137-153 (2013).
[30] ***Brudermann, T.*** Behavioral aspects for agent-based models of resilient urban systems / T. Brudermann, Y. Yamagata // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. 1-7 (2013).
[31] ***Cavallaro, M.*** Assessment of Urban Ecosystem Resilience through Hybrid Social–Physical Complex Networks / M. Cavallaro, D. Asprone, V. Latora, G. Manfredi, V. Nicosia // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. (2014).

Сведения об авторах

Георгий Ржевский, профессор. Ученый, предприниматель и консультант (Лондон, Великобритания). Является почётным профессором Центра Сложных Систем, Открытый Университет (Милтон-Кейнс, Великобритания); управляющим директором Digital Ecosystems Ltd, (Лондон, Хельсинки, Москва, Самара, Сингапур, Коломбо). ID автора (Scopus): 6603680750. *rzevski@gmail.com.*

Сергей Кожевников, научный сотрудник Чешского технического университета (Прага). Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в 2010 году и получил степень магистра по информационным технологиям в авиастроении. В 2015 году окончил аспирантуру в Самарском государственном техническом университете по специальности «Системный анализ». Научные интересы включают системный анализ, онтологии и базы знаний, интеллектуальный интернет вещей, когнитивные технологии, мультиагентные технологии. Имеет 14-летний опыт работы в IT и AI. ID автора (Scopus): 55575438600. *Sergei.Kozhevnikov@cvut.cz.*

Мирослав Свитек, доктор технических наук, профессор. Окончил Чешский технический университет в Праге в 1992 году. В 1996 году получил учёную степень по радиоэлектронике на электротехническом факультете Чешского технического университета в Праге. С 2005 года был назначен профессором прикладной информатики на факультете естественных наук Университета Матей Бел в Банской Быстрице (Словацкая Республика). С 2008 года является профессором в области инженерной информатики на факультете транспортных наук Чешского технического университета (Прага). С 2018 года является адъюнкт-профессором по теме Умный город Техасского университета (Эль-Пасо, США). Президент чешского кластера умных городов (www.czechsmartcitycluster.cz). ID автора (Scopus): 6602565421. *svitek@fd.cvut.cz.*

Поступила в редакцию 08.01.2020, после рецензирования 02.03.2020. Принята к публикации 26.03.2020.

Smart City as a Complex Adaptive System

George Rzevski[1], Sergei Kozhevnikov[2], Miroslav Svitek[3]

[1] *The Open University, Milton Keynes and Digital Ecosystems Ltd, London*
[2] *Czech Institute of Informatics, Robotics and Cybernetics, Czech Technical University, Prague*
[3] *Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University, Prague*

Abstract

As complexity of our political, social and economic environment increases, cities begin to experience new pressures, which makes the transformation from a conventional to a smart city urgent. It also requires re-thinking of what the key elements of the Smart City concept are. The paper does just that, and it provides an updated definition of Smart City. Further, it analyses problems experienced by urban conurbations caused by complexity of the Internet-based global economy and describes a practical solution – to design cities as complex adaptive systems capable of delivering services to citizens and visitors under conditions of complexity. The authors advocate an evolutionary transformation methodology that ensures a minimum of disruptions to city services. The concurrent design of multi-agent real-time schedulers for services and Smart City Ontology, described in this paper, enables the transformation to be carried out by several design teams, each, if necessary, at a different geographical location.

Key words: *Smart City, Complex Adaptive Systems, Urban Ecosystems, Self-organisation, Co-evolution*

Citation: *Rzevski G, Kozhevnikov S, Svitek M.* Smart City as a Complex Adaptive System [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 7-21. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-7-21.

List of figures and table

Figure 1 – Architecture of the Smart City services
Figure 2 – An example of Ontology for Emergency medical service
Figure 3 – Classes and relations of the ontology
Table 1 – Systems classifications

References

[1] ***Rzevski G, Skobelev P.*** Managing Complexity. WIT Press, Southampton, Boston, 2014. ISBN 978-1-84564-936-4.
[2] ***Svítek M.*** Telematic approach into program of smart cities, EATIS 2014, Valparaiso - Chile, 2014, ISBN 978-1-4503-2435-9.
[3] ***Svítek M, Skobelev P, Kozhevnikov S.*** Smart City 5.0 as an Urban Ecosystem of Smart Services, in Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P., Giret Boggino A., Botti V. (eds) Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. SOHOMA 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 853. Springer, Cham, 2020, p.426–438, ISBN 978-3-030-27476-4.
[4] ***Allam Z, Newman P.*** Redefining the Smart City: Culture, Metabolism and Governance. Smart Cities. 1, 4 (2018).

[5] ***Kozhevnikov S, Skobelev P, Pribyl O, Svítek M.*** Development of Resource-Demand Networks for Smart Cities 5.0. In Mařík V., Kadera P., Rzevski G., Zoitl A., Anderst-Kotsis G., A Min Tjoa, Khalil I. (eds) Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. HoloMAS 2019. Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol 11710. Springer AG 2019, pp. 203-217, ISBN 978-3-030-27877-9.

[6] ***Batty M, Axhausen K, Giannotti F, Pozdnoukhov A, Bazzani A, Wachowicz M, Ouzounis G, Portugali Y.*** Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics. 214, 481-518 (2012).

[7] ***Postranecky M, Svitek M, Carrillo EZ.*** SynopCity Virtual HUB – A testbed for Smart Cities, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazin, Vol. 10, Issue 2, 2018, pp. 50-57, DOI: 10.1109/MITS.2018.2806642.

[8] ***Uribe-Pérez N, Pous C.*** A novel communication system approach for a Smart City based on the human nervous system. Future Generation Computer Systems. 76 (2017).

[9] ***Trucco P, Petrenj B, Bouchon S, Dimauro C.*** Ontology-based approach to disruption scenario generation for critical infrastructure systems. International Journal of Critical Infrastructures. 12, 248 (2016).

[10] ***Evgenev GB.*** Industry 5.0 as integration of the Internet of Knowledge and the Internet of Things [In Russian]. Ontology of designing. 2019; 9(1): 7-23. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-7-23.

[11] ***Tsvetkov VYa, Buravtsev AV.*** Metrics of a complex determinate system. Ontology of designing. 2017; 7(3): 334-346. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-334-346.

[12] ***Mikoni SV***. Generalized ontological model of control in the concept of a socio-cyberphysical system [In Russian]. Ontology of designing. 2019; 9(2): 191-202. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-191-202.

[13] ***Maksimov NV, Golitsina OL, Ganchenkova MG, Sanatov DV, Razumov AV***. Semantic core of digital platform [In Russian]. Ontology of designing. 2018; 8(3): 412-426. - DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-412-426.

[14] ***Santipantakis G, Kotis K, Vouros GA.*** OBDAIR: Ontology-Based Distributed framework for Accessing, Integrating and Reasoning with data in disparate data sources, Expert Systems with Applications. 90, 464-483 (2017).

[15] ***Costin A, Eastman C.*** Need for Interoperability to Enable Seamless Information Exchanges in Smart and Sustainable Urban Systems. Journal of Computing in Civil Engineering. 33 (2019).

[16] ***Moraci F, Errigo M, Fazia C, Burgio G, Foresta S.*** Making Less Vulnerable Cities: Resilience as a New Paradigm of Smart Planning. Sustainability. 10, 755 (2018).

[17] ***Rzevski G.*** Intelligent Multi-Agent Platform for Designing Digital Ecosystems. In Vladimir Marik, Petr Kadera, George Rzevski, Alois Zolti, Gabriele Anderst-Kotsis, A Min Yjoa, Ismail Khalil (eds), Proceedings of the 9th International Conference, HoloMAS 2019, Linz, Austria, August 26–29, 2019, p.29-41. LNAI 11710.

[18] ***Ouyang M.*** A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. Structural Safety. 36-37, 23-31 (2012).

[19] ***Agudelo-Vera C, Leduc WRWA, Mels AR, Rijnaarts H.*** Harvesting urban resource towards more resilient cities. Resources, Conservation and Recycling. 64, 3-12 (2012).

[20] Index of Smart Cities, IMD World Competitiveness Centre, Smart City Observatory, Singapore University of Technology and Design. In: https://www.imd.org/smart-city-observatory/smart-city-index.

[21] ***Ganzha M, Paprzycki M, Pawłowski W, Szmeja P, Wasielewska K.*** Semantic interoperability in the internet of things: An over-view from the INTER-IoT perspective. J. Network Comput. 81, 111–124 (2017).

[22] ***Badii C, Bellini P, Cenni D, Martelli G, Nesi P, Paolucc M.*** Km4City Smart City API: An integrated support for mobility services. IEEE Int. Conf. on Smart Computing, 1–8 (2016).

[23] ***Gorodetsky VI, Skobelev PO.*** Digital platform of cyber-physical systems. XIII All-Russian meeting on management issues of VSPU-2019, Moscow, June 17 - 20, 2019: Transactions. M.: Institute of Management Problems. V.A. Trapeznikova RAS, 2019.

[24] ***Seedah DP, Choubassi C, Leite F.*** Ontology for querying heterogeneous data sources in freight transportation. J. Comput. Civ. Eng. 30 (4): 04015069 (2016).

[25] ***Howsawi A, Zhang J***. An ontology to support the move towards sustainable construction in Saudi Arabia. ASCE Int. Workshop on Computing in Civil Engineering, 296–303 (2017).

[26] ***Bilgin G, Dikmen I, Birgonul MT.*** An ontology-based approach for delay analysis in construction. KSCE J. Civ. Eng. 22 (2), 384–398 (2018).

[27] ***Skobelev PO, Zhilyaev AA, Lakhin OI, Mayorov IV, Simonova EV.*** The use of ontology in a multi-agent adaptive planning system. Proceedings of the XX International Conference "Problems of Control and Modeling in Complex Systems", Samara, September 03-06, 2018 - Samara, 2018. - P.367-375. - ISBN 978-5-473-01200-2.

[28] ***Mustapha K, Mcheick H, Mellouli S.*** Smart Cities and Resilience Plans: A Multi-Agent Based Simulation for Extreme Event Rescuing (2016).

[29] ***Massei M, Tremori A.*** Simulation of an urban environment by using intelligent agents within asymmetric scenarios for assessing alternative command and control network-centric maturity models. The Journal of Defense Modelling and Simulation: Applications, Methodology, Technology. 11, 137-153 (2013).

[30] ***Brudermann T, Yamagata Y.*** Behavioral aspects for agent-based models of resilient urban systems. Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. 1-7 (2013).

[31] ***Cavallaro M, Asprone D, Latora V, Manfredi G, Nicosia V.*** Assessment of Urban Ecosystem Resilience through Hybrid Social–Physical Complex Networks. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. (2014).

About the authors

Prof. George Rzevski, an academic, entrepreneur and consultant, based in London, UK. He is Emeritus Professor, Centre for Complexity and Design, The Open University, Milton Keynes, UK and Managing Director, Digital Ecosystems Ltd, London, Helsinki, Moscow, Samara, Singapore, Colombo. Author ID (Scopus): 6603680750. *rzevski@gmail.com.*

Sergey Kozhevnikov research scientist at the Czech Technical University in Prague. Graduated from the Samara State Aerospace University in 2010 and has obtained a master degree in Information Technologies in Aircraft construction, specialty "PLM technologies". In 2015 finished the PhD program in Samara State Technical University, specialty "System Analysis". Research interests include system optimization and system analysis, ontologies and knowledge bases, smart Internet of Things, cognitive technologies, multi-agent technology for real-time scheduling. 14 years' experience in the IT and AI. Author ID (Scopus): 55575438600. *Sergei.Kozhevnikov@cvut.cz.*

Prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr.h.c., FEng., EUR ING graduated from the Czech Technical University in Prague, in 1992. In 1996, he received the Ph.D. degree in radioelectronic at Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague. Since 2005, he has been a professor in applied informatics at Faculty of Natural Sciences, University of Matej Bel in Banska Bystrica, Slovak Republic. Since 2008, he has been full professor in engineering informatics at Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University in Prague. Since 2018, he has been adjunct professor in smart cities at University of Texas at El Paso, USA. Miroslav Svítek is president of Czech Smart City Cluster (www.czechsmartcitycluster.cz). Author ID (Scopus): 6602565421. *svitek@fd.cvut.cz.*

Received January 8, 2020. Revised March 02, 2020. Accepted March 26, 2020.