

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

INTELLIGENT SYSTEMS



УДК 004.05; 004.942
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-4-38-47>

Оригинальная статья
Original Paper

Метод структурно-параметрической адаптации «умного города» к цифровой экономике

К. А. Радкевич^{1✉}, С. В. Кругликов²

¹ОАО «Гипросвязь»,
ул. Сурганова, 24, Минск, 220012, Беларусь
✉E-mail: radkevich@giprosvjaz.by

²Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

Аннотация

Цели. Взаимодействие «умного города» с цифровой экономикой можно раскрыть и проанализировать в рамках применения метода структурно-параметрической адаптации, который позволяет адаптировать параметры модели системы и ее структуру для обеспечения оптимальной работы в условиях изменяющейся внешней среды. Рассмотреть концепцию «умного города» можно исходя из принципов структурно-параметрической адаптации, таких как интероперабельность, децентрализация, виртуализация, возможности работы в режиме реального времени, модульности и ориентации на услуги. В рамках структурно-параметрического анализа «умный город» рассматривается как сложная многоуровневая киберфизическая система.

Методы. Используются методы структурно-параметрической адаптации и структурно-параметрической оптимизации.

Результаты. Разработаны общий вид алгоритма структурно-параметрической адаптации системы и математическая модель задачи структурно-параметрической оптимизации систем «умного города».

Заключение. Для решения задач построения, оптимизации и адаптации структуры системы «умного города» необходимо опираться на технические требования к системе и возможности используемой инфраструктуры. Для этого может также применяться метод структурно-параметрической адаптации.

Ключевые слова: структурно-параметрическая адаптация, принципы структурно-параметрической адаптации, «умный город», киберфизическая система, информационная система, математическая модель

Благодарности. Исследование выполнялось в рамках НИР ГПНИ «Исследование, обоснование и определение путей (направлений) развития создаваемых в Республике Беларусь систем «умного» города (региона)» (№ гос. регистрации 20220061).

Для цитирования. Радкевич, К. А. Метод структурно-параметрической адаптации «умного города» к цифровой экономике / К. А. Радкевич, С. В. Кругликов // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 38–47. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-4-38-47>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 11.09.2023
Подписана в печать | Accepted 02.11.2023
Опубликована | Published 29.12.2023

Method of structural-parametric adaptation of "smart city" to digital economy

Kseniya A. Radkevich^{1✉}, Sergey V. Kruglikov²

¹*JSV "Giprosvjaz",
st. Surganova, 24, Minsk, 220012, Belarus
✉E-mail: radkevich@giprosvjaz.by*

²*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract

Objectives. The interaction between a "smart city" and digital economy can be explored and analyzed within the framework of the structural-parametric adaptation method. This method allows the adaptation of the parameters and structure of the system model to ensure optimal functioning in the conditions of changing external environment. The concept of a "smart city" can be examined based on the principles of structural-parametric adaptation, such as interoperability, decentralization, virtualization, real-time operation, modularity, and service orientation. Within the scope of structural-parametric analysis, a "smart city" is regarded as a complex multi-level cyber-physical system.

Methods. Structural-parametric adaptation methods and structural-parametric optimization methods are employed.

Results. A general form of the algorithm for structural-parametric adaptation of the system and a mathematical model of the problem of structural-parametric optimization of "smart city" systems have been developed.

Conclusion. To address the challenges of constructing, optimizing, and adapting the structure of a "smart city" system, it is necessary to consider the technical requirements of the system and the capabilities of the infrastructure used, and to apply the structural-parametric adaptation method.

Keywords: structural-parametric adaptation, principles of structural-parametric adaptation, "smart city", cyber-physical system, information system, mathematical model

Acknowledgements. The research was conducted within the framework of the scientific research project "Investigation, justification, and determination of ways (directions) for the development of "smart city" systems in the Republic of Belarus" (Registration No. 20220061).

For citation. Radkevich K. A., Kruglikov S. V. *Method of structural-parametric adaptation of "smart city" to digital economy*. *Informatika [Informatics]*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 38–47 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-4-38-47>

Conflict of interest. The authors declare of no conflicts of interest.

Введение. Научный подход к проектированию сложных адаптивных систем, например системы «умного города», предполагает применение научных методов познания. Одним из направлений исследования «умных городов» является структурно-параметрический подход, включающий структурно-параметрический синтез, структурно-параметрическую адаптацию и структурно-параметрическую имплементацию. В процессе проектирования и разработки систем «умного города» можно использовать подход декомпозиции поставленной задачи, разложения и определения структуры с конкретными качественными и количественными показателями, анализа и сравнения имеющейся инфраструктуры и иных компонентов с запросами заказчика, выработки альтернативных решений, адаптации разрабатываемой модели системы к существующим реалиям, а также последующего синтеза системы и ее имплементации во времени и пространстве с постоянной ориентацией на изменяющиеся условия.

Определение принципов структурно-параметрической адаптации «умного города». «Умный город» выступает в роли концепции как встраивающийся в существующую экосистему цифровой экономики и подчиняющийся ее основным тенденциям развития, так и наоборот – как видоизменяющий данную экосистему в ходе своего развития. Анализ динамики городов [1] демонстрирует, что представление о городах как о структурах, сохраняющих постоянное равновесие, является поверхностным, поскольку в большей мере данное состояние отражает лишь физические свойства города. В связи с тем что современная городская среда нуждается в постоянном развитии и активной адаптации к цифровой реальности, возникает необходимость оценки места «умного города» в экосистеме цифровой экономики страны.

В рамках подхода структурно-параметрической адаптации целесообразно рассмотреть «умного города» как киберфизической и мультиагентной системы. Современные города становятся сложной киберфизической системой, в которой вся физическая инфраструктура каждой подсистемы и растущее количество виртуальных структур, встроенных в виртуальный мир, объединены в единую сеть [2].

Принципы структурно-параметрической адаптации «умного города» как ключевого элемента экосистемы цифровой экономики могут быть следующими:

Принцип интероперабельности предполагает способность двух или более сетей, систем, устройств, приложений или компонентов обмениваться и легко использовать информацию безопасно, эффективно и практически не доставляя неудобств пользователю. Это взаимодействие киберфизических и социальных систем должно включать в себя интеллектуальные здания, инженерные коммуникации, интегрированную транспортную систему, уличные элементы и сооружения, больницы, учебные заведения, логистические центры, транспортно-пересадочные узлы, бизнес-центры, торговые объекты, энергоцентры и т. п.

Интероперабельность (совместимость) включает решение проблем, связанных с отсутствием согласованности в существующих стандартах «умного города», механизмов для сравнения и гармонизации инициатив по стандартизации, гармонизации и согласованности между существующими архитектурными решениями.

Сложность технологической экосистемы «умного города» вызвана множеством его компонентов как киберфизической системы. Однако общую структуру работы с данными можно выделить в нескольких категориях: зондирование, управление данными, объединение данных, обработка и визуализация [3].

Принцип виртуализации – это структурно-параметрический принцип, который предполагает использование виртуальных моделей городской инфраструктуры и услуг для улучшения и оптимизации городской жизни. Включает в себя разработку трехмерных моделей городских объектов, которые создаются на основе собранных данных о городской инфраструктуре и услугах, позволяющих создавать и тестировать новые проекты, не вмешиваясь в реальные структуры города. Трехмерные модели дают возможность использовать собранные данные для прогнозирования деятельности и поведения субъектов «умного города».

Принцип децентрализации заключается в том, что управление и контроль за различными системами и процессами в городе распределяются между узлами, которые находятся ближе к месту их использования [4]. Такой подход к управлению обеспечивает более эффективное приме-

нение ресурсов и возможность быстрого реагирования на изменения в окружающей среде. Каждая система может быть управляема с помощью своего собственного узла, который принимает решения на основе данных, полученных от различных источников.

Принцип ориентации на услуги обусловлен наличием в «умном городе» множества субъектов услуг. «Умный город» должен обеспечивать наличие вертикальных и горизонтальных связей между субъектами, а также реализовывать эти связи на всех этапах жизненного цикла продуктов и услуг. Для осуществления принципа ориентации на услуги необходимо создание цифровой инфраструктуры, которая позволяет обеспечивать доступность услуг и взаимодействие граждан с государственными и коммерческими службами в режиме онлайн.

Принцип модульности – один из ключевых принципов структурно-параметрической адаптации «умного города» – позволяет создавать гибкие и масштабируемые системы, состоящие из отдельных модулей, которые способны адаптироваться к различным изменениям в окружающей среде и потребностям городских жителей. Каждый из этих модулей выполняет конкретную функцию и может быть заменен или модифицирован без нарушения работы всей системы.

Принцип надежности определяет модель «умного города» как надежную систему, которая должна обеспечивать безопасность и конфиденциальность данных, а также защиту от возможных угроз безопасности [5]. Так, например, соображения безопасности исходят из того, что технологии связи, используемые для эффективной связи в «умных городах», подвержены различным проблемам безопасности. Конфиденциальность же исходит из множества подключенных устройств в «умных городах», что требует использования надежных инструментов криптографии для защиты устройств и данных от злоумышленников.

Принцип эволюционирования можно рассматривать с точки зрения усложнения цифровых технологий, составляющих «умный город». Концепция «умного города» получила свое начало еще в конце прошлого века с возникновением продуктов таких крупных корпораций, как CISCO и IBM (Generation 1.0), и сегодня перешла к этапу, называемому Generation 5.0: искусственный интеллект, робототехника, интернет вещей, 6G и т. п. [6]. Постоянная эволюция «умного города» в целом и технологий, применяемых в данной концепции, требует наличия гибких подходов к построению «умных городов» и их постоянному развитию.

Принцип устойчивости целесообразно рассматривать в связи с принципом эволюционирования. Устойчивость городов отражает способность городских систем (включая социологические и социотехнические сети) сохранять или быстро возвращаться к исходным функциям, быстро трансформировать системы для текущей или будущей адаптации [7].

Человеческие ресурсы выступают в качестве одного из ключевых компонентов «умного города», так как составляющие элементы «умного города» должны базироваться не только на цифровых решениях и средствах их регулирования и управления, но и на высококвалифицированных кадрах [1]. Данный принцип предполагает также наличие профильных организационных структур, ответственных за развитие «умного города».

Метод структурно-параметрической адаптации «умного города». В связи с большим количеством разработанных информационных систем (ИС) и средств для принятия решений особенностью развития и построения систем «умного города» является возможность применения метода структурно-параметрической адаптации уже созданных моделей систем к целям развития и внедрения для решения конкретных прикладных задач.

Применение метода структурно-параметрической адаптации обусловлено тем, что требования и возможности у различных городов и регионов разные, в связи с чем возникают определенные сложности:

- проблематичность адаптации системы без участия самих разработчиков;
- цели пользователей могут не совпадать с целями разработчиков системы;
- необходимое информационное обеспечение системы может отличаться от того, которым владеет пользователь.

К причинам, побуждающим изменять существующие ИС, в особенности такие, как «умный город», можно отнести изменение требований к идентификации и авторизации, точности опи-

сания отдельных процессов, необходимость в расширении круга решаемых задач как потребность введения новых ресурсов и сервисов. Поэтому в практике внедрения и применения таких систем возникают проблемы модификации и адаптации структуры модели системы, отдельных ее блоков, включения в модель новых модулей, позволяющих реализовывать практические цели пользователя, а также определения необходимой информации и параметров, входящих в модель. Процесс решения данных проблем можно отнести к адаптивной структурно-параметрической процедуре. Адаптивная методология в данном случае понимается как система, способная изменяться (автоматически или полуавтоматически) с целью обеспечения устойчивых показателей регионального развития при изменении внешних условий [8]. Массовое внедрение и использование информационных технологий на основе концепции интернета вещей [9] позволяют современным городам выявлять, интерпретировать и удовлетворять потребности государственного и частного секторов.

Одним из основных этапов проектирования систем «умного города» и их элементов являются исследования по выбору и обоснованию критерия качества (оптимальности) проектных решений. Исходными данными для этих исследований служат результаты целевого, ресурсного и проектного анализов. Критерий качества – это объектный показатель, имеющий обычно количественное выражение, позволяющий определить степень соответствия систем их функциональному (целевому) назначению, т. е. мера достижения поставленной цели. Рассматривать только один критерий при проектировании системы «умного города» недостаточно, так как это приводит к необъективной оценке системы. Иными словами, не учитываются такие важные характеристики системы, как ее быстродействие, удобство и др. Для учета этих характеристик необходимо ввести в задачу структурно-параметрической адаптации дополнительные критерии. При правильном выборе ограничений для второстепенных критериев задача будет решена без необходимости многократного последовательного прохода по всем критериям. Основные этапы структурно-параметрической адаптации системы показаны на рис. 1.

Структурно-параметрический синтез «умного города». Под структурно-параметрическим описанием объекта понимается такое его описание, которое показывает, из каких подсистем, блоков, агрегатов и деталей состоит данный объект, как эти компоненты соединены и взаимодействуют между собой, каковы их весовые, габаритные характеристики и т. п. Структурно-параметрический синтез моделей ИС, в том числе «умного города», и их адаптация к конкретным внешним и внутренним условиям являются главными условиями их использования.

Системы «умного города» содержат компоненты параметрической оптимизации, что позволяет, варьируя параметрами, обеспечивать нахождение характеристик ИС в заданных разработчиком пределах. Структура самой системы при этом задается на этапе проектирования, и в дальнейшем ее изменение связано с большими затратами как времени, так и денежных средств. Выбранная в начале разработки структура к этапу внедрения системы может стать неоптимальной и содержать архитектурные ошибки. Поэтому на этапе проектирования систем «умного города» необходимо предоставить разработчику возможность не только параметрического синтеза, но и структурного. Это в значительной мере усложняет задачу оптимизации, так как нахождение оптимальной структуры не поддается полной автоматизации, отсутствуют алгоритмы нахождения решения за приемлемое время. Тем не менее вычислительные средства позволяют оценить и перебрать большее количество вариантов, что весьма упрощает для разработчика задачу структурного синтеза.

В отличие от задач параметрической оптимизации при структурном синтезе возникает ряд принципиальных трудностей математического характера: дискретный характер проектных решений и зависимостей, отсутствие отработанных методов формализации и решения этих задач.

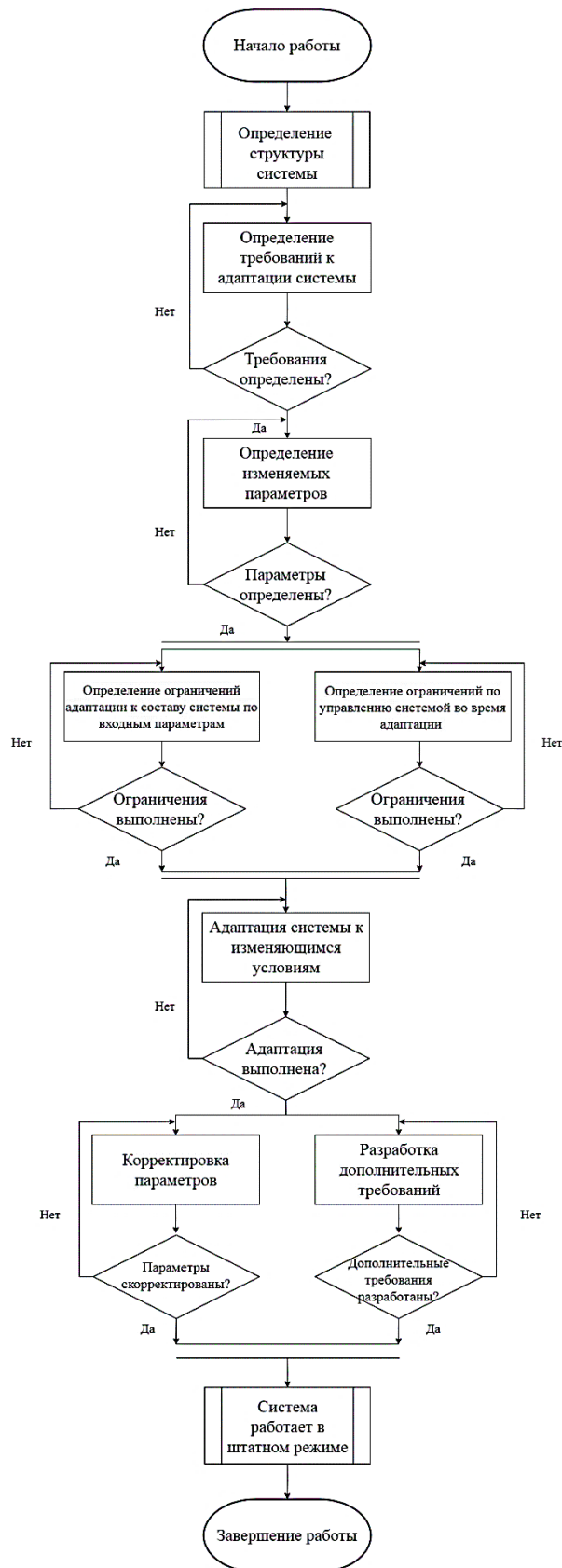


Рис. 1. Общий вид алгоритма структурно-параметрической адаптации системы
Fig. 1. General view of the algorithm for structural-parametric adaptation of the system

Отметим следующие особенности структурно-параметрического синтеза¹:

– при структурно-параметрической оптимизации варьируются не только параметры, но и структура, что приводит к уникальной целевой функции для каждой структуры либо к добавлению ограничений на множество структур;

– математическая модель учитывает не только параметры объекта, но и структуру и ограничения на нее, т. е. должна быть достаточно универсальной, чтобы описывать не отдельно взятую систему «умного города», а некоторый их класс;

– для решения задачи структурно-параметрического синтеза необходимо разработать алгоритм, основанный либо на аналитическом подходе, либо на численных методах, первый отличается точностью полученного решения, а вторые – универсальностью.

Анализ структурных составляющих архитектуры «умного города» и процессов взаимодействия между ними, а также информационных потоков, сервисов и систем позволил определить необходимые компоненты математической модели системы «умного города», с помощью которой возможно решение задачи структурно-параметрического синтеза. Математическую модель системы «умного города» представим в виде кортежа

$$SCS = \{S, HW, SW, V_s, E_s\}, \quad (1)$$

где SCS – модель системы «умного города»;

S – структура системы «умного города»;

$HW = \{ST, VST, QST, CST\}$ – множество аппаратных характеристик системы «умного города», в которые входят данные о множестве хранилищ информации ST , их стоимости VST , объеме накопителя QST и пропускной способности CST ;

$SW = \{SD, SM, SR\}$ – множество программных характеристик системы «умного города», включающих все возможные сочетания используемых средств разработки SD , структуры модулей системы «умного города» SM и конкретной программной реализации SR ;

V_s – оценка годовых экономических затрат на системы «умного города»;

E_s – оценка производительности системы «умного города».

Под структурой системы «умного города» будем понимать формализованное представление перечисленных выше понятий в виде кортежа с множеством объектов, меняющих свои состояния в результате проведения операций множеством пользователей в некоторые моменты времени под влиянием множества внешних и внутренних воздействий:

$$S = \{U, P, E, O, T, G\}, \quad (2)$$

где $U = \{u_i | i = \overline{1..I}\}$ – множество объектов: цифровые и электронные сервисы, информационные системы и ресурсы, I – общее количество объектов;

$P = \{p_q | q = \overline{1..Q}\}$ – множество пользователей, Q – общее количество пользователей;

T – множество дискретных моментов времени, представленных натуральными числами;

E – множество воздействий на объекты, как внешних, так и внутренних;

$O = \{o_l | l = \overline{1..L}\}$ – множество операций, выполняемых над объектами, L – общее количество операций;

$G = \{G_i(C_i, O) | i = \overline{1..I}\}$ – множество структур информационных потоков, каждый из которых отражает жизненный цикл объекта u_i как последовательную смену состояний через осуществление множества операций O .

Структурные соображения играют первостепенную роль как при анализе, так и при синтезе систем самого разного типа. Действительно, наиболее важный этап процесса разработки модели как раз и состоит в выборе структуры модели интересующей нас системы. На основе модели, представленной выше, разработана структурная схема системы «умного города» (рис. 2).

¹Обухов, А. Д. Структурно-параметрический синтез системы управления электронным документооборотом научно-образовательного учреждения : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / А. Д. Обухов ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2016. – 216 с.

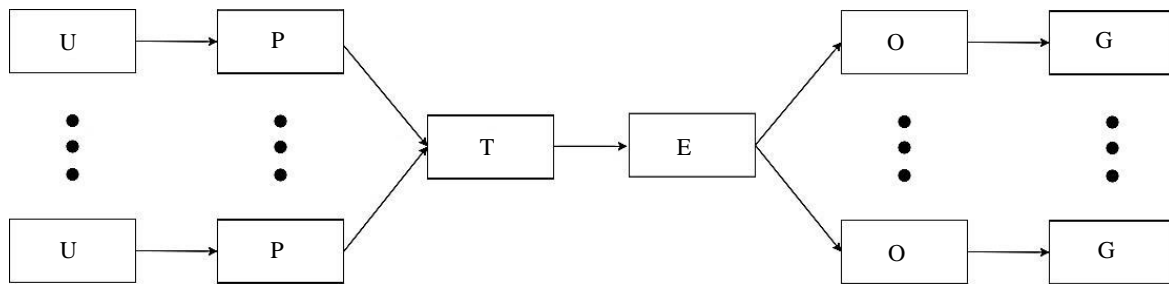


Рис. 2. Структурная схема «умного города»
Fig. 2. Structural diagram of a "smart city"

Рассмотрим элементы описанных выше множеств. Объекту u_i соответствует некоторое множество состояний, каждое из которых обуславливает содержимое объекта в определенный промежуток его жизненного цикла:

$$u_i \rightarrow C_i, \quad (3)$$

где $C_i = \{c_{ij} | j = \overline{1..J_i}\}$ – множество состояний объекта u_i , J_i – количество таких состояний. Каждое состояние определяется как кортеж из множества атрибутов объекта и их значений в заданный промежуток времени:

$$c_{ij} = (\{a_{in}, d_{ijn} | a_{in} \in A_i, d_{ijn} \in D_{ijn}, n = \overline{1..N_i}\}, T_{c_{ij}}), \quad (4)$$

где $A_i = \{a_{in} | n = \overline{1..N_i}\}$ – множество атрибутов объекта u_i с соответствующими им элементами множества значений атрибутов $D_i = \{D_{ij} | j = \overline{1..J_i}\}$ для каждого состояния c_{ij} :

$$D_i = \{d_{ijn} | n = \overline{1..N_i}\}. \quad (5)$$

Здесь N_i – количество атрибутов объекта; $T_{c_{ij}}$ – множество дискретных моментов времени t , в которые существует состояние c_{ij} .

Для того чтобы получить текущее состояние объекта u_i в момент времени t , необходимо использовать функцию состояния

$$\Psi(u_i, t): u_i \rightarrow c_{ij}, c_{ij} \in C_i, t \in T_{c_{ij}}. \quad (6)$$

Элемент пользователь p_q в модели системы «умного города» представляет собой совокупность ряда атрибутов, характеризующую его роль:

$$p_q = \{(\{ap_{qm}\}, t) | t \in T_{p_q}\}, \quad (7)$$

где $\{ap_{qm}\}$ – множество атрибутов пользователя, определяющих доступные ему функции, уровень доступа, личные данные и т. д. Множество атрибутов объединено в кортеж с моментами времени, в которые значения атрибутов являются актуальными;

T_{p_q} – множество моментов времени существования пользователя p_q в системе «умного города».

Как было указано выше, воздействия разделяются на внешние EE и внутренние IE : $EE \cup IE$. Внешние воздействия включают новые нормативные правовые и технические акты и стандарты, регламентирующие построение ИС, а также заказы от сторонних организаций и прочие воздействия, осуществляемые извне на систему. Внутренние воздействия формируются на основе внешних прямым способом либо косвенно. Воздействие, вне зависимости от того, является оно внешним или внутренним, направлено на достижение конкретного результата – получе-

ние услуги или реализации сервиса либо некоторого их множества, которые удовлетворяют условиям, заданным воздействием. К таким условиям относятся ограничения на круг лиц, ответственных за получение результата; требования к содержанию сервисов / услуг / систем / ресурсов, затраченному времени и т. д.

Следующий компонент математической модели системы «умного города» – это годовые экономические затраты. Представим их в виде

$$V_s = V_d + V_{hw} + V_{st} + V_p + V_t, \quad (8)$$

где V_s – экономические затраты за год;

V_d – стоимость разработки системы;

V_{hw} – затраты на оборудование и терминалы пользователей;

V_{st} – стоимость хранения информации;

V_p – стоимость обработки информации;

V_t – стоимость доставки информации.

Производительность системы «умного города» напрямую зависит от количества запросов и оказываемых электронных и цифровых услуг, обрабатываемых в единицу времени, с учетом затрат на их обработку. Разработанная система «умного города» должна обеспечивать производительность сервисов / услуг / систем / ресурсов в заданных заказчиком пределах. Исходя из вышеперечисленного, представим производительность системы «умного города» следующим образом:

$$E_s = \frac{W_s}{T_s}, \quad (9)$$

где W_s – объем работы с запросами пользователей;

T_s – затраченное на эту работу время.

Заключение. Системы «умного города» являются сложными адаптивными системами. Они выделяются на фоне других информационных систем своим концептуальным отличием, необходимостью соответствовать множеству заданных параметров и учитывать воздействия внешней среды и изменяющихся условий. Применение метода структурно-параметрической адаптации позволяет адаптировать параметры модели системы и ее структуру для обеспечения оптимальной работы с учетом особенностей основных подсистем, запросов пользователей и требований заказчика. Определение альтернативных вариантов, критериев и требований, оптимизация состава и структуры системы «умного города» как раз и являются задачами структурно-параметрической адаптации. Анализируя совокупность достоинств и недостатков подходов построения систем «умного города», необходимо подчеркнуть, что выбор определенной структуры системы должен опираться на технические требования к системе и возможности используемой инфраструктуры, а применение метода структурно-параметрической адаптации является актуальным при разработке систем «умного города».

Вклад авторов. *К. А. Радкевич* предложила общий вид алгоритма структурно-параметрической адаптации системы. *С. В. Кругликов* сформулировал цель, задачи и методы исследования. Оба автора принимали участие в подготовке текста статьи, анализе и интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Smart cities from the perspective of systems / U. Ammara [et al.] // Systems. – 2022. – Vol. 10, iss. 3. – P. 77. <https://doi.org/10.3390/systems10030077>
2. Postranecky, M. Smart city near to 4.0 – an adoption of industry 4.0 conceptual model / M. Postranecky, M. Svitek // 2017 Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague, Czech Republic, 25–26 May 2017. – Prague, 2017. – P. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/SCSP.2017.7973870>
3. A minimum set of common principles for enabling Smart City Interoperability / A. Frascella [et al.] // TECHNE – J. of Technology for Architecture and Environment. – 2018. – Vol. 1. – P. 56–61. <https://doi.org/10.13128/Techne-22739>

4. Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey / L. U. Khan [et al.] // *IEEE Internet of Things J.* – 2020. – Vol. 7, no. 10. – P. 10200–10232. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2987070>
5. Urban computing for sustainable smart cities: recent advances, taxonomy, and open research challenges / I. A. T. Hashem [et al.] // *Sustainability.* – 2023. – Vol. 15, iss. 5. – P. 3916. <https://doi.org/10.3390/su15053916>
6. Kumar, M. Probabilistic data structures in smart city: Survey, applications, challenges, and research directions / M. Kumar, A. Singh // *J. of Ambient Intelligence and Smart Environments.* – 2022. – Vol. 14, no. 4. – P. 229–284.
7. Do smart cities represent the key to urban resilience? Rethinking urban resilience / S. A. Apostu [et al.] // *Intern. J. of Environmental Research and Public Health.* – 2022. – Vol. 19, iss. 22. – P. 15410. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215410>
8. Акимова, О. Е. Формирование адаптивной методологии регионального развития в контексте концепции «умный город» / О. Е. Акимова, С. К. Волков, И. М. Кузлаева // *Вестник Томского гос. ун-та. Экономика.* – 2020. – № 52. – С. 53–64. <https://doi.org/10.17223/19988648/52/3>
9. Bibri, S. E. The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability / S. E. Bibri // *Sustainable Cities and Society.* – 2018. – Vol. 38. – P. 230–253.

References

1. Ammara U., Rasheed K., Mansoor A., Al-Fuqaha A., Qadir J. Smart cities from the perspective of systems. *Systems*, 2022, vol. 10, iss. 3, p. 77. <https://doi.org/10.3390/systems10030077>
2. Postranecky M., Svitek M. Smart city near to 4.0 – an adoption of industry 4.0 conceptual model. *2017 Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague, Czech Republic, 25–26 May 2017*. Prague, 2017, pp. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/SCSP.2017.7973870>
3. Frascella A., Brutti A., Gessa N., De Sabbata P., Novelli C., ..., He L. A minimum set of common principles for enabling Smart City Interoperability. *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, 2018. vol. 1, pp. 56–61. <https://doi.org/10.13128/Techne-22739>
4. Khan L. U., Yaqoob I., Tran N. H., Kazmi S. M. A., Dang T. N., Hong C. S. Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, vol. 7, no. 10, pp. 10200–10232. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2987070>
5. Hashem I. A. T., Usmani R. S. A., Almutairi M. S., Ibrahim A. O., Zakari A., ..., Chiroma H. Urban computing for sustainable smart cities: recent advances, taxonomy, and open research challenges. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 5, p. 3916. <https://doi.org/10.3390/su15053916>
6. Kumar M., Singh A. Probabilistic data structures in smart city: Survey, applications, challenges, and research directions. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 229–284.
7. Apostu S. A., Vasile V., Vasile R., Rosak-Szyrocka J. Do smart cities represent the key to urban resilience? Rethinking urban resilience. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, iss. 22, p. 15410. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215410>
8. Akimova O. E., Volkov S. K., Kuzlaeva I. M. *Formation of an adaptive methodology for regional development in the context of the "smart city" concept*. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Jekonomika [Bulletin of Tomsk State University. Economics]*, 2020, no. 52, pp. 53–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988648/52/3>
9. Bibri S. E. The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 2018, vol. 38, pp. 230–253.

Информация об авторах

Радкевич Ксения Анатольевна, исследователь в области технических наук, магистр управления, младший научный сотрудник, ОАО «Гипросвязь».
E-mail: radkevich@giprosvjaz.by

Кругликов Сергей Владимирович, доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Information about the authors

Kseniya A. Radkevich, Researcher in the Field of Technical Sciences, Master of Management, Junior Researcher, JSV "Giprosvjaz".
E-mail: radkevich@giprosvjaz.by

Sergey V. Kruglikov, D. Sc. (Milit.), Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof., Director General, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by