

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>

Обобщенные теоретические модели киберфизических систем

И.В. Ватаманюк ¹ ✉, Р.Н. Яковлев ¹

¹ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
14 линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является попытка унифицировать существующие видения киберфизических систем, ввести формальные модели киберфизических систем, рассмотреть сходства и отличия этого понятия со смежными информационно-технологическими концепциями.

Методы. В работе рассмотрены существующие видения киберфизических систем, их взаимосвязь со смежными информационно-технологическими концепциями, в частности, с «Интернетом вещей». Для решения поставленной задачи декомпозиции видений данных систем были использованы средства системного анализа и аппарат теории множеств.

Результаты. В работе описаны высокоуровневая и теоретико-множественная модели киберфизических систем. Высокоуровневая модель системы описывает взаимосвязь между пользователями, преобразователями, логическим и физическим уровнями. Центральное место в киберфизических системах занимают преобразователи, которые предназначены для взаимодействия между логическими и физическими компонентами и представляют собой датчики и исполнительные механизмы. Множественная модель киберфизических систем учитывает возможность обмена энергией и информацией между компонентами. Кроме того, в работе предложена обобщенная динамическая модель функционирования киберфизической системы, отражающая процессы изменения состояния ее компонентов под воздействием влияния внешней среды и внутренних факторов.

Заключение. Предложенная теоретико-множественная модель представляет собой основу для разработки и описания поведения киберфизических систем. Данная модель описывает взаимосвязь компонентов киберфизических систем и показывает влияние одного из параметра на все функциональные компоненты, с которыми данный параметр ассоциирован. Таким образом, для «интеллектуализации» окружения необходимо разработать ряд технических требований, учитывающий специфику функциональных компонент и роль пользователей, что позволит реализовать информационно-управляющие сервисы на основе данных об окружающей среде, поведении пользователя, его интересах и предпочтениях.

Ключевые слова: киберфизическая система; интернет вещей; распределенные системы; корпоративная информационная система; динамические модели программного управления.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РНФ (№16-19-00044П).

Для цитирования: Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 161-175. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>.

Поступила в редакцию 12.11.2019

Подписана в печать 03.12.2019

Опубликована 23.12.2019

© Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н., 2019

Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems

Irina V. Vatamaniuk¹ ✉, Roman N. Iakovlev¹

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
14-th Linia V.I. 39, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to attempt to unify the existing views of cyberphysical systems, introduce formal models of cyberphysical systems, and consider similarities and differences between this concept and related information technology concepts.

Methods. The paper considers the existing views of cyber-physical systems, their relationship with related information technology concepts, in particular, with the "Internet of things". To solve the problem of decomposition of the visions of these systems, we used the tools of system analysis and the set theory framework.

Results. The paper describes high-level and set-theoretic models of cyberphysical systems. The high-level system model describes the relationship between users, converters, and the logical and physical levels. Converters are the centerpiece of cyberphysical systems; they are designed to interact between logical and physical components and are sensors and agents. The set model of cyberphysical systems takes into account the possibility of exchanging energy and information between components. Besides, the paper offers a generalized dynamic model of the cyberphysical system functioning that reflects the processes of changing the state of its components under the influence of the environment and internal factors.

Conclusion. The proposed set-theoretic model is the basis for developing and describing the behavior of cyberphysical systems. This model describes the relationship of components of cyberphysical systems and shows the impact of one of the parameters on all functional components with which this parameter is associated. Thus, in order to "intellectualize" the environment, it is necessary to develop a number of requirements that take into account the specifics of functional components and the role of users, which will allow implementing data management services based on data about the environment, user behavior, interests and preferences.

Keywords: cyberphysical system; Internet of things; distributed systems; enterprise information system; dynamic program control models.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was performed with the support of RSF (№16-19-00044П).

For citation: Vatamaniuk I. V., Iakovlev R. N. Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 161-175 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>.

Received 12.11.2019

Accepted 03.12.2019

Published 23.12.2019

Введение

Впервые термин «киберфизическая система» (КФС, Cyber-physical system, CPS) был введен сотрудницей Национального научного фонда США (Na-

tional Science Foundation в США) Эллен Гилл для обозначения распределенной системы, в которой обработка информации происходит непосредственно в ее физических элементах [1]. Поскольку

данная концепция возникла сравнительно недавно (точкой отсчета принято считать американский симпозиум “NSF Workshop on cyber-physical systems” в 2006 году), ее развитие затрудняют терминологические разногласия, отсутствие технологических стандартов (ISO, ГОСТ, NIST) и, как следствие, отсутствие единого видения положения КФС среди других современных технологических концепций, а также демаркационных границ между этой и соседними областями. Целью данной статьи является попытка унифицировать существующие видения КФС, ввести формальные модели КФС, рассмотреть сходства и отличия со смежными информационно-технологическими концепциями.

Систематические обзоры технологий КФС [2-4] выделяют следующие области знаний, наиболее близко связанные с рассматриваемой: встроенные системы реального времени (real-time embedded systems), распределенные вычислительные системы, автоматизированные системы управления техническими процессами и объектами, беспроводные сенсорные сети, интернет вещей (Internet of Things, IoT), промышленный интернет вещей (Industrial Internet), межмашинное взаимодействие (Machine-to-Machine, M2M), туманные и облачные вычисления (fog и cloud computing), комплексные адаптивные системы, холоновые (агентные) производственные системы. Большинство исследователей указывают, что понятие

«киберфизическая система» развилось из области встроенных систем реального времени [2]. Вполне естественно, что следующим шагом эволюционирования таких систем стало объединение разрозненных устройств в единую вычислительную сеть и обеспечение их взаимодействия посредством интернет-протоколов (интернет вещей). Усложнение способов взаимодействия между вычислительными и физическими элементами и породило потребность в новом междисциплинарном подходе.

Как уже было отмечено, понятием, наиболее близким к КФС, является «интернет вещей» (Internet of Things, IoT). Термины «КФС» и «IoT» имеют разное происхождение и схожие определения, оба соответствуют тенденции интеграции цифровых возможностей, включая сетевое подключение и вычислительные мощности, в физические устройства и системы. Обстоятельный анализ публикаций по соответствующей тематике за последнее десятилетие [5] показывает, что среди экспертов нет единого мнения о взаимном соответствии данных терминов: встречаются мнения о частичном перекрытии значения понятий КФС и IoT [6], их эквивалентности [7], о включении понятия «КФС» в IoT [8] и обратном включении [9]. В целом, отмечается тенденция сближения понятий «КФС» и «IoT» [5] – несмотря на различие в происхождении, современные системы, рассматриваемые с точки зрения функциональности, попадают под формальное определение обо-

их терминов. Для того, чтобы понять, как соотносятся между собой различные определения КФС и IoT, рассмотрим сущности на уровне компонентов, которыми оперирует последний. К ним относятся следующие 4 категории «умных» объектов [10], определяемые их функциональностью:

- отслеживаемые объекты (Trackable Objects): однозначно идентифицируемые мобильные объекты, способные предоставлять данные в отношении своего актуального физического местонахождения;

- объекты данных (Data Objects): объекты, которые генерируют данные либо обрабатывая сигналы различного рода датчиков, либо исходя из их собственных свойств и текущего состояния;

- интерактивные объекты (Interactive Objects): объекты, которые способны взаимодействовать со средой, в которой находятся, измеряя различные параметры среды, и/или изменяя их;

- «умные» объекты (Smart Objects): интерактивные объекты, которые могут некоторым образом обрабатывать получаемые ими данные и реагировать, исходя из полученной в результате обработки соответствующих данных информации [10].

Если изначально технологии IoT фокусировались на отслеживаемых объектах, то сейчас концепция расширилась и включает: объекты, оснащенные различными датчиками (объекты данных), например, бытовые приборы, генерирующие новые данные для аналитики и

создания дополнительных персонализированных функций и услуг; объекты, которые активно взаимодействуют с физическим миром через исполнительные механизмы (интерактивные объекты), например дистанционно управляемый дверной замок, а также объекты, которые имеют аналитические возможности для адаптивного и реагирующего взаимодействия («умные» объекты), например автономное транспортное средство [11].

Можно заметить, во-первых, что многие IoT-системы представляют собой так называемые системы систем (system-of-systems), в которых сами компоненты могут быть сочетанием отслеживаемых объектов, объектов данных, интерактивных или «умных» объектов. Управлять требованиями к проекту и оценить обеспечение качества обслуживания (QoS) [12, 13] для каждого такого компонента можно только в контексте общей функциональной цели и требований к взаимодействию с другими компонентами в системе. Во-вторых, включение в концепцию IoT взаимодействия между логическими и физическими компонентами сближает ее с концепцией КФС, что является следствием смещения внимания разработчиков с отслеживаемых объектов и объектов данных на интерактивные и «умные» объекты. Действительно, многие существующие IoT-решения, приводимые в качестве примеров отслеживаемых объектов или объектов данных, уместнее рассматривать как компонен-

ты интерактивной или интеллектуальной системы, если рассматривать их в функциональном контексте. В-третьих, отдельное устройство или система может относиться сразу к нескольким вышеозначенным категориям. В частности, смартфон может использоваться в качестве отслеживаемого объекта в одном приложении (например, приложении для навигации или поиска телефона), в качестве объекта данных в другом (отправка информации друзьям о вашем текущем местоположении), а также в качестве интерактивного или «умного» объекта (например, удаленное взаимодействие с системой управления энергопотреблением в доме). Таким образом, важно рассматривать «умные» объекты именно в функциональном контексте интегрированной системы.

Сравнивая суждения о терминологии КФС и IoT из различных источников, авторы [5] показывают, что проводимые различия в терминологии зависят от различий во взглядах специалистов по четырем основным вопросам: 1) управление: делается ли акцент на управлении на уровне системы; 2) платформа: является ли IoT платформой для развертывания КФС или наоборот; 3) Интернет-подключение: какие требования выдвигаются к сетевому подключению, и какая роль отводится IP-сетям в системе; 4) человек: характер и роль человеко-машинного взаимодействия в системе. В целом, подробный анализ каждого из пунктов показывает, что наиболее часто приводи-

мые аргументы недостаточны для проведения однозначной демаркационной линии между понятиями КФС и IoT [5]. Таким образом, отсутствие четких и непротиворечивых разграничительных метрик и постепенное сближение определений в литературе свидетельствуют о формирующемся консенсусе в отношении будущей интеграции современных концепций КФС и IoT. В связи с этим фактом, примем термин «киберфизическая система» для обозначения системы систем (system-of-systems), состоящей из инженерных физических систем, интегрированных с сетевыми, вычислительными системами, а также системами данных, и взаимодействующих с человеком, который может выступать в различных ролях по отношению к системе (пользователь, оператор, элемент динамического окружения и т.д.).

Материалы и методы

Национальный институт стандартов и технологий США предполагает в недалеком будущем выпустить единый стандарт для обоих классов систем КФС и IoT [5]. Единая точка зрения отражает сближение данных определений и может быть выражена следующим образом: Интернет вещей и киберфизические системы включают в себя взаимодействующие: человека (в разных ролях), а также логические, физические, преобразовательные компоненты, разработанные для функционирования посредством интегрированной логики и физики. Таким образом, унифициро-

ванная модель компонентов предусматривает 4 категории компонентов КФС и IoT: логические, физические, преобразователи и компоненты с участием человека.

Прежде чем перейти к аналитическому описанию формальной постановки задачи и теоретико-множественной модели киберфизической системы, рассмотрим высокоуровневую модель компонентов КФС (рис.). На логическом уровне КФС процессы описываются языком формальной логики и реализуются при помощи стандартных технологий сбора, преобразования и хранения информации в информационно-коммуникационных системах [14, 15]. На физическом уровне, как правило, рассматривается реализация КФС, разработанная или адаптированная для взаимодействия с ожидаемой операционной средой для достижения одной или нескольких предполагаемых целей при соблюдении ограничений, налагаемых на систему. Связующим звеном между логическим и физическим уровнями являются преобразователи – различные сенсорные устройства, датчики, собирающие данные о физическом состоянии киберфизического окружения, интерпретация которых может использоваться для изменения логического состояния системы, а также исполнительные механизмы, способные оказывать воздействия на физическое состояние такой среды. Именно преобразователи

занимают в КФС центральную роль, обеспечивая взаимодействие физических и логических компонентов. Отметим также, что присутствующая на рисунке фигура человека может представлять различные классы пользователей (стейкхолдеры, системные администраторы, пользователи, обслуживающий персонал и т.д.), взаимодействующих с системой как на информационном, так и на физическом уровне. Таким образом, представленные элементы отражают четыре основных категории компонентов КФС: логические компоненты, физические компоненты, пользователи, а также преобразователи, включающие в себя датчики и исполнительные механизмы.

Теперь рассмотрим обобщенную теоретико-множественную модель КФС. В соответствии с представленным выше определением, киберфизическая система *CPS* может быть укрупненно представлена следующим кортежем параметров:

$$CPS = \langle Ph, Lg, Sens, Act, Hum \rangle, \quad (1)$$

где *Ph* – множество физических компонентов; *Lg* – множество логических компонентов; *Sens* – множество датчиков; *Act* – множество исполнительных механизмов и *Hum* – множество лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС или находящихся внутри киберфизического окружения и являющихся конечными пользователями системы.

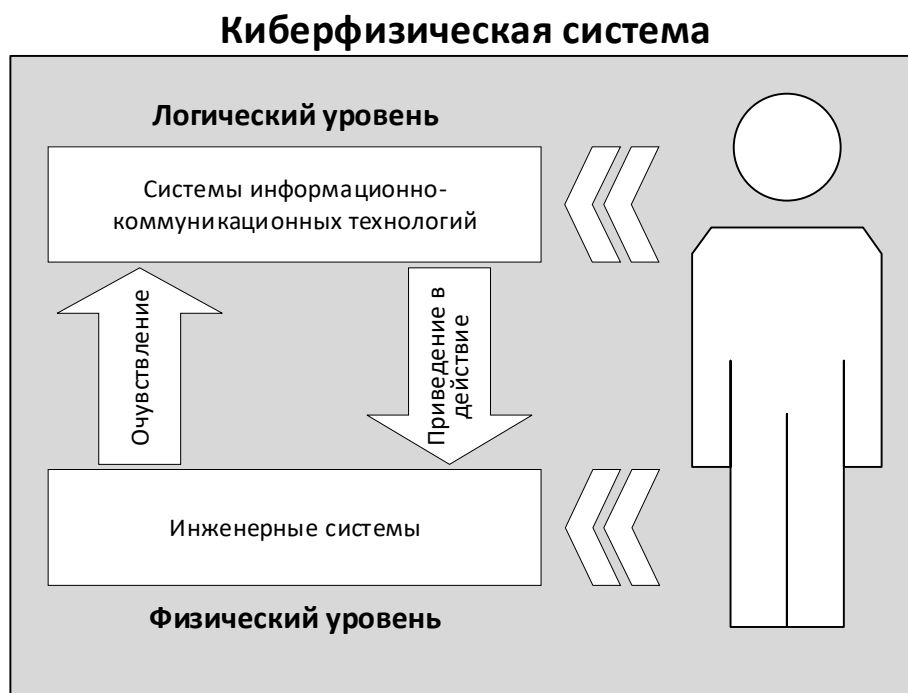


Рис. Обобщенная модель компонентов КФС

Fig. The generalized model of the CPS components

К физическим компонентам Ph относятся различного рода инженерные модули, размещенные в среде функционирования КФС, аппаратное обеспечение и его компоненты, а также сетевая инфраструктура физического уровня. Отметим также, что протекающие в данных компонентах процессы имеют исключительно физический характер и включают в себя различного рода процессы по преобразованию и передаче энергии.

Логические компоненты Lg включают в себя все уровни программного обеспечения (встроенное ПО, процессоры, драйверы, операционные системы и приложения), сети и сетевое окружение логического уровня, а также информацию на уровне данных, информации и знаний [16]. Соответственно протекающие в данных компонентах про-

цессы являются преимущественно информационными и включают в себя различные процессы по сбору, агрегации, обработке и анализу данных, а также процессы создания, получения, хранения, поиска и распространения информации.

Датчики $Sens$ и исполнительные механизмы Act , согласно [17], являются входными и выходными преобразователями соответственно. Датчики собирают информацию о физическом состоянии среды для последующей обработки на уровне логических компонентов, в то время как исполнительные механизмы изменяют его, в результате получения управляющих сигналов со стороны Lg . Модель функционирования датчиков $Sens$ может включать в себя описание процессов предобработки сигнала, аналого-цифрового преобразования, ка-

либровки, дискретизации и сопоставления метаданных. Актуаторы могут быть представлены широким рядом механических устройств, начиная от вибромотора в смартфоне или фитнес-устройстве и заканчивая сложными промышленными манипуляторами.

Взаимодействие людей с компонентами КФС включает в себя проектирование, эксплуатацию, обеспечение систем, а также взаимодействие с ними и их непосредственное использование. Так, человек может быть как пользователем системы Hum_U , так и ее компонентом Hum_C или же элементом внешней среды Hum_{Env} . Таким образом, множество Hum включает в себя три других множества различной мощности, характеризующих все многообразие пользователей:

$$Hum = \{Hum_C, Hum_U, Hum_{Env}\}. \quad (2)$$

В контексте функционирования КФС определим множество функциональных компонентов КФС F , как совокупность логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовую единицу функциональности:

$$F = \{\langle Ph_i, Lg_j \rangle \mid Ph_i \subseteq Ph, Lg_j \subseteq Lg, \\ i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}. \quad (3)$$

Предполагается, что каждый функциональный компонент КФС должен обладать следующими возможностями:

- наличие вычислительных мощностей и программного обеспечения, необходимых для реализации собственных функций;

- наличие достаточного объема памяти для хранения всех необходимых для осуществления собственной деятельности данных;

- способность устанавливать сетевые соединения с другими компонентами системы и обеспечивать целевую передачу данных;

- способность к получению и сбору необходимой информации о состоянии окружающей среды и других компонентов системы;

- способность к самодиагностике в контексте выявления собственной неисправности, а также к информированию связанных компонентов в случае возникновения такой неисправности.

Каждый функциональный компонент ассоциирован с определенным набором датчиков, исполнительных механизмов и людей. Такие наборы в совокупности образуют множество преобразователей функциональных компонентов Tr :

$$Tr = \{Sens_i, Act_j, Cons_k \mid Sens_i \subseteq Sens, \\ Act_j \subseteq Act, Cons_k \subseteq Cons, \\ i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, l}, \quad (4)$$

что позволяет функциональным компонентам осуществлять различного рода преобразования на физическом и логическом уровнях в контексте взаимодействия с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и т.д.) – на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации – на логическом уровне. Таким образом, для любой КФС может быть определено отображение f :

$$f: F \rightarrow Tr, \quad (5)$$

а КФС соответственно может быть охарактеризована множеством упорядоченных пар вида:

$$CPS = \{\langle F_i, Tr_i \rangle \mid F_i \in F, Tr_i = f(F_i), i = \overline{1, n}\}. \quad (6)$$

Следует отметить, что элементы любого преобразователя потенциально могут быть интероперабельными, как следствие наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа преобразователей иных функциональных компонентов.

Согласованное взаимодействие функциональных компонентов КФС позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС S_{CPS} потребителям $Cons$, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и люди:

$$Cons = F \cup Hum. \quad (7)$$

Стоит также отметить, что множество потребителей в общем случае может отличаться для каждого отдельного сервиса КФС:

$$Cons_S = \{Cons_i \mid Cons_i \subseteq Cons, i = \overline{1, n}\}. \quad (8)$$

Введем отображение g :

$$g: S_{CPS} \rightarrow Cons. \quad (9)$$

Поскольку сервисы КФС реализуются посредством согласованного взаимодействия различных наборов функциональных компонентов, то также может быть определено следующее отображение h :

$$h: CPS \rightarrow S_{CPS}. \quad (10)$$

Таким образом, композиция отображений $h \circ g$ позволяет установить соответствие между потребителями сервисов (будь то пользователь или другой функциональный компонент КФС) и функциональными компонентами, необходимыми для реализации соответствующих сервисов КФС.

Рассмотрим обобщенную динамическую модель функционирования КФС. Введем, согласно [18], обобщенный вектор состояния КФС и вектор выходных характеристик КФС, а также обобщенный вектор соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \left\| \begin{matrix} \bar{x}_F^T & \bar{x}_{Tr}^T \end{matrix} \right\|^T, \\ \bar{y}(t) &= \left\| \begin{matrix} \bar{y}_F^T & \bar{y}_{Tr}^T \end{matrix} \right\|^T. \end{aligned} \quad (11)$$

Допустим, некоторое изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$ приводит к изменению n различных физических параметров P_i :

$$P_{ik} = \{p_{ik} \in P_i \mid \xi_{ph}(t) \rightarrow P_i, k = \overline{1, n}\} \quad (12)$$

и регистрируется датчиками, в совокупности формирующими набор $Sens_k$:

$$Sens_{ij} = \{sens_{ij} \in Sens_i \mid P_i \rightarrow Sens_i, j = \overline{1, m}\}. \quad (13)$$

Поскольку каждый датчик $Sens_{ij}$ из набора датчиков $Sens_i$, регистрирующих изменение параметра p_{ik} , может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида $Sens_i$, таких что $Sens_i \subseteq Tr_i$, $i = \overline{1, n}$, соответственно регистрация изменений датчик $Sens_{ij}$ приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$ с чьими преобразователями $Tr_{ij} \subseteq Tr$ ассоциирован данный датчик.

Учитывая то, что с каждым из преобразователей функциональных компонентов Tr_i , $i = \overline{1, n}$, ассоциирован целый набор датчиков $Sens_i$, то обновленное состояние $\bar{x}_F(t_1)$, каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе лишь тех изменений физических параметров среды P_{tk} , которые были зарегистрированы датчиками, принадлежащими набору $Sens_{ti}$. При этом в набор $Sens_{ti}$ входят только те датчики, которые: а) зарегистрировали изменение внешней среды ($Sens_{ti} \subseteq Sens_i$); б) принадлежат набору датчиков, входящему в состав соответствующего преобразователя функциональных компонентов Tr_i ($Sens_{ti} \subseteq Sens_i$):

$$Sens_{ti} = Sens_i \cap Sens_i. \quad (14)$$

Ответ системы на изменения информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ во многом аналогичен ответу на изменения в физической среде. Допустим, изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ приводит к изменению p логических параметров L_i :

$$L_{ij} = \{l_{ij} \in L_i \mid \xi_{Lg}(t) \rightarrow L_i, j = \overline{1, p}\} \quad (15)$$

и регистрируется логическими компонентами КФС $Lg_i \subseteq Lg$. Поскольку каждый логический компонент Lg_{ij} из набора Lg_i может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида Lg_i , таких что $Lg_i \subseteq F_i$, $i = \overline{1, n}$, соответственно регистрация изменений компонентом Lg_{ij} приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$ с которыми ассоциирован данный компонент.

Учитывая то, что с каждым из функциональных компонентов F_i ассоциирован целый набор логических компонентов Lg_i , то обновленное состояние $\bar{x}_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе изменений логических параметров L_{ti} , зарегистрированных компонентами, принадлежащими набору Lg_{ti} , в который входят только те логические компоненты, которые: а) зарегистрировали изменение логических параметров ($Lg_{ti} \subseteq Lg_i$); б) принадлежат набору логических компонентов, входящему в состав соответствующего функционального компонента F_i ($Lg_{ti} \subseteq Lg_i$):

$$Lg_{ti} = Lg_i \cap Lg_i. \quad (16)$$

Отметим, что в обоих случаях изменение состояния i -го функционального компонента F_i приводит к опосредованному изменению состояний физических и логических компонентов системы, принадлежащих наборам Ph_i и Lg_i соответственно. Кроме того, переход i -го функционального компонента из состояния $\bar{x}(t_0)$ в состояние $\bar{x}(t_1)$ может индуцировать изменение выходных характеристик системы $\bar{y}(t)$, в частности, посредством активации исполнительных механизмов из набора $Act_i \subseteq Tr_i$.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было установлено, что датчики реагируют на изменение физической среды $\xi_{Ph}(t)$, вследствие чего формируется новое состояние системы $\bar{x}(t_1)$, отражающее данные изменения, аналогичным образом осуществляется реакция системы на изме-

нение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$. Исполнительные механизмы выполняют, по сути, обратную функцию, преобразуя обобщенные управляющие сигналы системы $u_{pr}(\bar{y}(t), t)$ и $v(\bar{x}(t), t)$ (которые являются по сути планами функционирования основных элементов и управлений, реализующих планы на этапе применения в условиях возмущающих воздействий $\xi(t)$) в новое представление системы $\bar{y}(t)$ и соответствующим образом воздействуя на физическую среду, в которой функционирует КФС. Непрерывная циклическая реализация описанных в представленной модели процессов изменения состояния компонентов КФС и внешней среды и есть суть функционирования киберфизических систем.

Отметим, что несмотря на некоторую схожесть, датчики и исполнительные механизмы имеют существенное различие с точки зрения неопределенности: входные данные первых $Input_{Sens}(P)$ подвержены физической неопределенности, тогда как входные данные вторых $Input_{Act}(L)$ подвержены вычислительной неопределенности. Кроме того, модели датчиков и модели исполнительных механизмов, используемые в КФС, порождают дополнительные формы неопределенности, которые не эквивалентны друг другу. Управление этими разнородными источниками неопределенности требует разработки соответствующего формально-математического аппарата структурно-функционального синтеза сложных технических систем [18-20].

Выводы

Предложенное модельно-аналитическое обеспечение функционирования КФС представляет собой формальную основу для разработки и описания поведения КФС. Так, при проектировании CPS киберфизического окружения в масштабах территориально ограниченной организации необходима разработка средств взаимодействия множеств Ph физических компонентов, Lg логических компонентов, $Sens$ датчиков, Act исполнительных механизмов и Hum различных типов пользователей, а для реализации и оценивания качества функционирования сервисов информационно-навигационного обслуживания, предоставляемых киберфизическим окружением в условиях динамически изменяющихся состояний всех компонентов системы, требуется разработка алгоритмических моделей и программных инструментов машинного обучения для вычисления количественной оценки степени удовлетворенности пользователя от предоставленных ему сервисов.

«Интеллектуализация» окружения, таким образом, требует специализированного подхода к техническим требованиям с точки зрения функциональных компонентов и ролей пользователей и позволяет обеспечить предоставление пользователю проактивных персонализированных информационно-управляющих сервисов на основе анализа окружающей среды, поведения пользователя, исторических данных о его запросах, интересах и предпочтениях.

Список литературы

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach. London: MIT Press, 2016.
2. Park K.-J., Zheng R., Liu X. Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges // Editorial Computer Communications. 2012. № 36(1). P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>
3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey // IEEE Systems Journal. 2014. № 9(2). P. 350-365. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2322503>
4. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. № 6. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
5. Cyber-physical systems and Internet of Things / C. Greer, M. Burns, D. Wollman, E. Griffor // NST Special Publication. 1900. № 202. P.52. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1900-202>
6. Ma H. Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges // Journal of Computer Science and Technology. 2011. № 26(6). P. 919-924. <https://doi.org/10.1007/s11390-011-1189-5>.
7. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT) // IEEE Internet Initiative. 2015. №1. P. 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf
8. PICASSO Opportunity Report. Towards Enhanced EU-US ICT Pre-Competitive Collaboration. PICASSO Project; 2017 [процитировано 5 ноября 2019]. URL: http://www.picasso-project.eu/wp-content/uploads/2017/03/PICASSO-Opportunity-Report_March-2017_revMar19.pdf
9. Yeboah-ofori A., Abdulai J., Katsriku F. Cybercrime and Risks for Cyber Physical Systems: A Review. Preprints 2018. 2018. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0066.v1>
10. Ibarra-Esquer J.E., González-Navarro F.F., Flores-Rios B.L., Burtseva L., Astorga-Vargas M.A. Tracking the evolution of the internet of things concept across different application domains // Sensors. 2017. №17(6). P. 1379. <http://www.doi.org/10.3390/s17061379>
11. Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Мобильная робототехническая платформа как компонент киберфизического интеллектуального пространства // Экстремальная робототехника. 2017. №1. С. 37-42.
12. Vatamaniuk I.V., Malov D.A., Levonevskii D.K. Modeling the QoE Estimation for Services of the Cyberphysical Intelligent Space // Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW). 2018. P. 436-439.
13. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Малов Д.А. Обеспечение доступности сервисов корпоративного интеллектуального пространства посредством управления

потоком входных данных // Программная инженерия. 2019. № 10(1). С. 20-29. <http://www.doi.org/10.17587/prin.10.20-29>

14. Иконникова А.В., Петрова И.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение. 2008. № 11. С. 62-69.

15. Соловьева И.В., Соколов Б.В. Алгоритм коррекции планов работы корпоративной информационной системы на основе метода позиционной оптимизации // Труды СПИИРАН. 2012. №1(20). С. 153-164. <https://doi.org/10.15622/sp.20.8>

16. U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC); 2010 [процитировано 5 ноября 2019]. URL: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>

17. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2012.

18. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

19. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S. P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications // International Journal of Production Research. 2019. №57(2). P. 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>

20. Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. <https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001>

References

1. Lee E.A., Seshia S.A. *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. London, MIT Press Publ., 2016.

2. Park K.-J., Zheng R., Liu X. Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges. *Editorial Computer Communications*, 2012, no. 36(1), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>

3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey. *IEEE Systems Journal*, 2014, no. 9(2), pp. 350-365. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2322503>

4. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 2017, no. 6, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

5. Greer C., Burns M., Wollman D., Griffor E. Cyber-physical systems and Internet of Things. *NIST Special Publication*. 1900; 202: 52. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1900-202>.

6. Ma H. Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges. *Journal of Computer Science and Technology*. 2011; 26(6): 919-924. <https://doi.org/10.1007/s11390-011-1189-5>.

7. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative*, 2015, no. 1, pp. 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf
8. PICASSO Opportunity Report. Towards Enhanced EU-US ICT Pre-Competitive Collaboration. PICASSO Project; 2017 [Quoted November 5, 2019]. Available: http://www.picasso-project.eu/wp-content/uploads/2017/03/PICASSO-Opportunity-Report_March-2017_revMar19.pdf
9. Yeboah-ofori A., Abdulai J., Katsriku F. Cybercrime and Risks for Cyber Physical Systems: A Review. *Preprints 2018*. 2018. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0066.v1>
10. Ibarra-Esquer J.E., González-Navarro F.F., Flores-Rios B.L., Burtseva L., Astorga-Vargas M.A. Tracking the evolution of the internet of things concept across different application domains. *Sensors*, 2017, no. 17(6), 1379 p. <http://www.doi.org/10.3390/s17061379>
11. Vatamanyuk I.V., Saveliev A.I. Mobil'naya robototekhnicheskaya platforma kak komponent kiberfizicheskogo intellektual'nogo prostranstva [Mobile robotic platform as a component of cyber-physical intellectual space]. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 37-42 (In Russ.)
12. Vatamaniuk I.V., Malov D.A., Levonevskii D.K. Modeling the QoE Estimation for Services of the Cyberphysical Intelligent Space. *Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW)*. 2018, pp. 436-439.
13. Levonevskiy D. K., Vatamaniuk I. V., Malov D. A. Obespechenie dostupnosti servisov korporativnogo intellektual'nogo prostranstva posredstvom upravleniya potokom vkhodnykh dannykh [Ensuring the Availability of Services of the Corporate Intellectual Space by Controlling the Flow of Input Data]. *Programmnaya Ingeneria = Software Engineering*, 2019, 10(1), pp. 20-29. (In Russ.). <http://www.doi.org/10.17587/prin.10.20-29>.
14. Ikonnikova A.V., Petrova I.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. Dinamicheskaya model' kompleksnogo planirovaniya modernizatsii i funktsionirovaniya informatsionnoi sistemy [A dynamic model of integrated planning for the modernization and functioning of the information system]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie = Proceedings of Higher Educational institutions: Instrumentation*, 2008, no. 11, pp. 62-69. (In Russ.).
15. Solovyeva I.V., Sokolov B.V. Algoritm korrektsii planov raboty korporativnoi informatsionnoi sistemy na osnove metoda pozitsionnoi optimizatsii [Algorithm of plan operation correction of corporate information system based on the position optimization method]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2012, no. 1(20), pp. 153-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.20.8>.
16. U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC); 2010 [Quoted November 5, 2019]. Available at: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>
17. Pallás-Areny R, Webster J. *Sensors and Signal Conditioning*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2012.

18. Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoi dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 410 p. (In Russ.).

19. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S. P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications. *International Journal of Production Research*, 2019, no. 57(2), pp. 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>.

20. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modelei i polimodel'nykh komplekso* [Qualimetry of Models and Polimodel Complexes]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2018. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ватаманюк Ирина Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Irina V. Vatamaniuk, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Roman N. Iakovlev, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета

С.Ф. Яцун¹ ✉, Х.Х.М. Аль Манджи¹, А.А. Постольный¹, А.С. Яцун¹

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В статье приведено описание реабилитационного робототехнического комплекса EXOLITE-REHAB, позволяющего осуществлять реабилитационные упражнения нижних конечностей пациентов путем выполнения подъема ноги, вертикализации, приседаний и прочих видов движения. Во многих странах ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении опорно-двигательного аппарата. Поэтому целью данной статьи является изучение и задание основных закономерностей и алгоритмов на основе математических моделей, описывающих управляемое движение экзоскелета нижних конечностей на примере моделирования движения голеностопного шарнира экзоскелета.

Методы. Ключевой особенностью комплекса является применение копирующей системы управления, которая позволяет обеспечить заданное движение голеностопного сустава человека с высокой степенью точности в широком диапазоне изменения параметров. Применяются методы математического моделирования движения голеностопного сустава с учетом последующего возможного их применения на моделировании движения звеньев экзоскелета.

Результаты. Для моделирования работы робототехнического комплекса применяется кинематическое задание траектории движения голеностопного шарнира. Для нахождения вектора обобщенных координат решается обратная задача кинематики с применением векторно-матричного метода с применением матрицы Якоби. Результаты численного моделирования показывают высокую сходимость и адекватность предложенного метода.

Заключение. В статье рассмотрен метод применения копирующей системы управления, обладающей достаточной степенью точности копирования траектории. Результаты моделирования копирующей системы управления реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB, работающей по разработанному алгоритму, показывают, что она в достаточной степени точности способна повторять требуемую траекторию. В будущем планируется более углубленно исследовать систему на трёхмерной модели с электроприводами.

Ключевые слова: паттерны походки; экзоскелет нижних конечностей; кинематическая модель; датчик силы; голеностопный шарнир.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00773А.

© Яцун С.Ф., Аль Манджи Х.Х.М., Постольный А.А., Яцун А.С., 2019