



УДК 004.822:004.896:007.51

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-532-539

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

THEORETICAL BASES OF THE CONSTRUCTION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEM DEVELOPMENT

А.В. Смирнов¹, В.В. Безручко², О.О. Басов¹
A.V. Smirnov¹, V.V. Bezrzhko², O.O. Basov¹

¹) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

²) Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», Россия, 302034, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35

¹) Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49 Kronverkskiy Ave, St. Petersburg, 197101, Russia

²) Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302034, Russia

E-mail: sav_smirnof@mail.ru, oobasov@mail.ru

Аннотация

Основной целью исследования является разработка терминологического базиса, концептуальной и формальной математической моделей социокиберфизических систем с использованием метода исторической ретроспективы для воссоздания образа современной социокиберфизической системы, ее концептуальное моделирование и формальное описание с использованием методов системного анализа и элементов теории множеств. В результате исследования была представлена концептуальная модель социокиберфизической системы в виде четырех относительно самостоятельных, хотя и тесно связанных, взаимодействующих подсистем: физической, транспортной, информационной и когнитивной. На формальном языке теории множеств определены основные понятия социокиберфизической системы: объекты, образы и тезаурусы подсистем и пользователя, расходуемые, пополненные и актуальные ресурсы, позволившие формализовать описание системы и ее подсистем, определить ее основные свойства. Представленное формальное описание модели социокиберфизической системы позволило рассмотреть основные задачи проектирования и оптимизации ее характеристик, к числу которых отнесены: повышение ее надежности, эффективная обработка больших объемов гетерогенных данных в режиме реального времени, обеспечение информационной безопасности существующих и вновь проектируемых систем. Результаты исследований использованы для формализации и постановки вновь возникающих задач проектирования социокиберфизических систем и оптимизации их характеристик, а также определения путей их решения.

Abstract

The main purpose of the study is development of terminological basis, conceptual and formal mathematical models of socio-cyberphysical systems using the method of historical retrospective method to recreate the concept of a modern socio-cyberphysical system, its principal design and formal description using system analysis methods and elements of set theory. As a result of the study was presented a conceptual model of a socio-cyberphysical system as four relatively self-contained, although closely connected interacting subsystems: a physical system, a transport system, an information system and a cognitive system. In formal terms of set theory the main concepts of a socio-cyberphysical system are defined: objects, images and thesauri of subsystems and user, the resources (expended, replenished, current), allowing to formalize the description of the system as well of its subsystems, define its main features. The presented formal

description of the modelled socio-cyberphysical system allowed to consider the main optimization problems of its characteristics, particularly: reliability optimization, efficient processing of heterogeneous big data in real-time mode, ensuring of information security in the maintained and newly designed systems. The results of the research were used in formalization of known problems and in formulation of new tasks when designing socio-cyberphysical systems and optimization of their features, as well when addressing how to solve these problems.

Ключевые слова: социок cyberфизическая система, концептуальная модель, терминологический базис, ресурсы, пользователь.

Keywords: socio-cyberphysical system, conceptual model, terminological basis, resources, user.

Введение

Существенное влияние опережающего развития информационных и телекоммуникационных технологий на производственные процессы, их автоматизация привели к заметной трансформации традиционных социальных структур, их модификации и интенсивному развитию сложных киберфизических систем (КФС). Последние по своей природе являются достаточно разнородными, что обуславливает сложность задачи их формального и достаточно конкретного описания. Усугубляется ситуация тем, что взаимодействие КФС осуществляется с человеком [Смирнов, Левашова, 2017; Horvath, Gerritsen, 2012; Ronzhin, Saveliev, Basov, 2016; Ронжин, Басов, 2016], преобразуя их в социо-КФС [Agah, 2001]. Однако именно благодаря присутствию в социо-КФС человека (пользователя) появляется возможность получения новых знаний и эволюционного развития таких систем.

В таких условиях актуальной является задача создания теоретических и методологических основ построения социо-КФС, позволяющих с единых позиций описывать физические (материально-энергетические), информационные и когнитивные (социальные) процессы, определяющие процесс функционирования таких систем [Сотников, Катасонова, 2015].

Концептуальная модель социо-КФС

Социо-КФС возникли как результат развития технических и технологических средств (рис. 1), наиболее значимыми из которых являются «Интернет вещей» (IoT) [http://www.internet-of-things-research.eu/about_iiot.htm; Antsaklis, 2014], полимодальные [Basov, 2017; Basov, Kipyatkova, Saveliev, 2017] и робототехнические [Motienko, Basov, Dorozhko, Tarasov, 2016; Пшихопов, Медведев, 2018] системы, и в настоящее время представляют собой совокупность четырех различных компонент: физического, транспортного, информационного и когнитивного (рис. 2) [Liu, Yang, Wen, Zhang, Mao, 2011; Рогозинский, 2017]. Такой подход согласуется с концепцией социо-КФС [Смирнов, Левашова, 2017; <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en>], предполагающей интеграцию физического, кибернетического и социального пространств.

Предложенная концептуальная модель (рис. 2) развивает методологические принципы, заложенные в работе [Сотников, Катасонова, 2015; <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en>]. В процессе своего экстенсивного развития телекоммуникационные системы эволюционировали в инфокоммуникационные, размывая тем самым границу между соответствующими подсистемами концептуальной модели. Физический компонент предоставляет транспортной подсистеме услуги по переносу материально-энергетических ресурсов. Указанные услуги определяют одно из основных отличий предложенной модели социо-КФС от доменной модели инфокоммуникаций [Сотников, Катасонова, 2015].

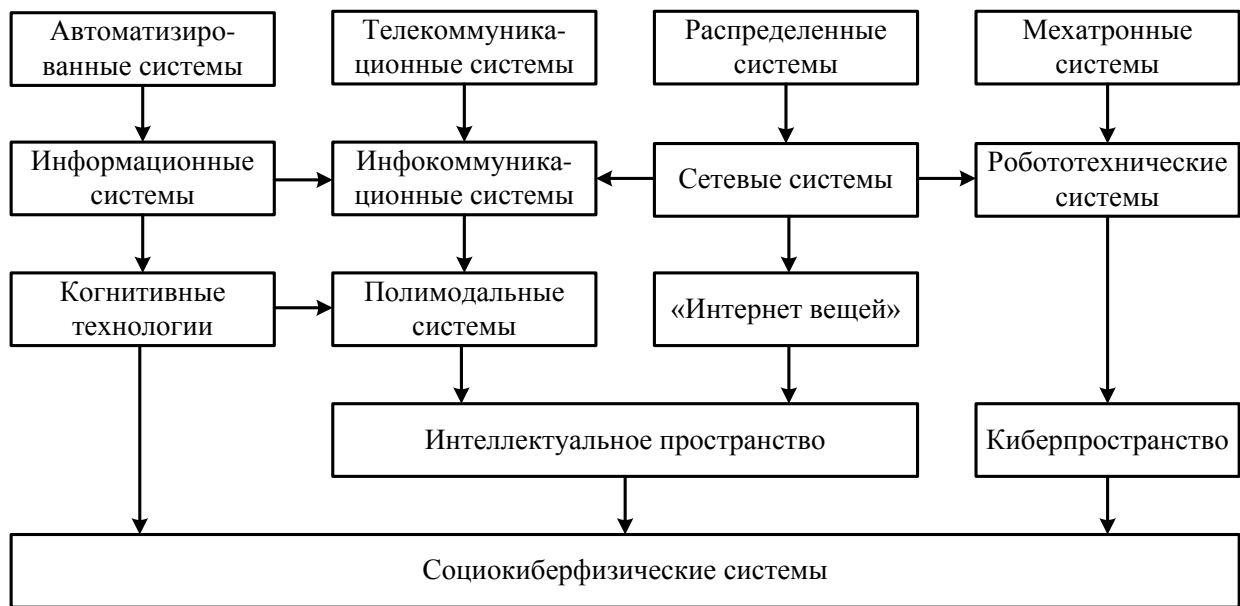


Рис. 1. Эволюция социокиберфизической системы
Fig. 1. Evolution of socio-cyberphysical system

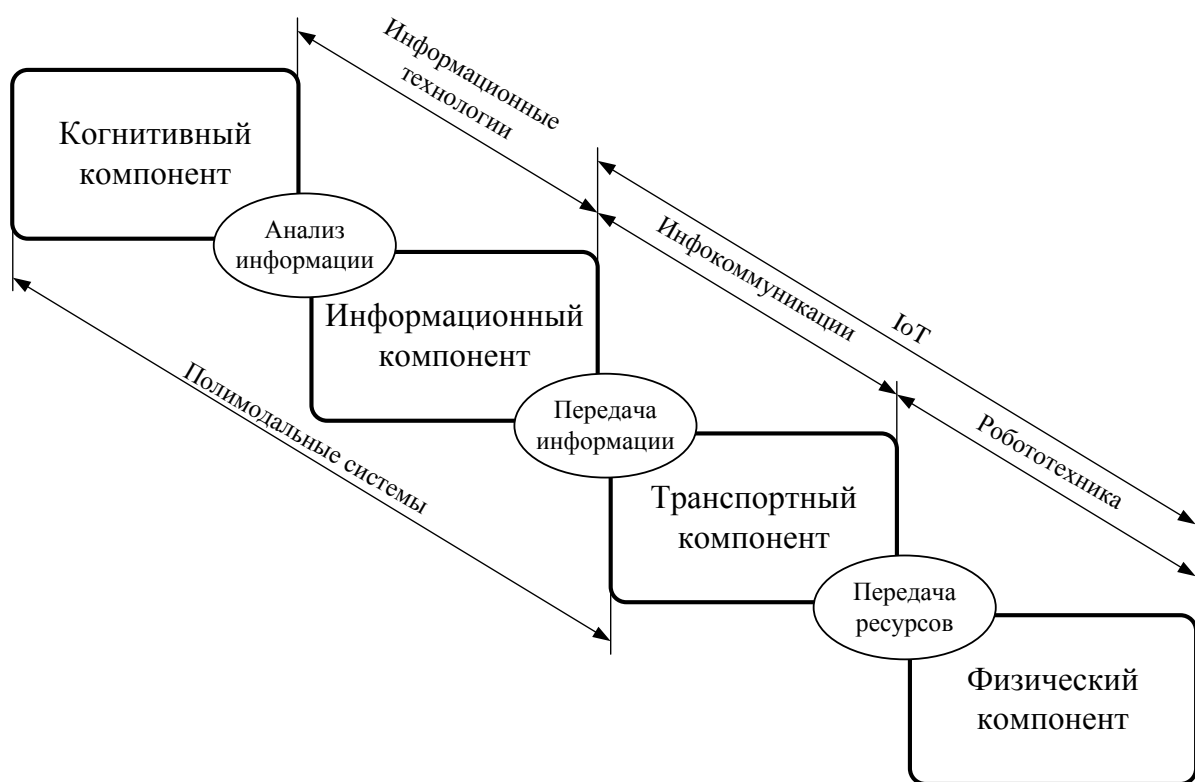


Рис. 2. Концептуальная модель социокиберфизической системы
Fig. 2. Conceptual model of a socio-cyberphysical system

Терминологический базис и формальное описание модели социо-КФС

Основу терминологического базиса социо-КФС составляют понятия «объект», «образ», «тезаурус», «ресурсы» (информация), «пользователь», введенные в статью [Сотников, Катасонова, 2015].

Взаимодействие физического F , транспортного T , информационного I и когнитивного C компонентов социо-КФС осуществляется посредством взаимодействия ресурсов, образующих эти пространства. Учитывая, что взаимодействие физических ресурсов осуществляется на основе информационных технологий, передача информации не может осуществляться без использования ресурсов транспортной подсистемы, а когнитивные (социальные) ресурсы являются продуктом обработки информационных ресурсов, в данной работе будем оперировать понятием «ресурсы» для всех подсистем социо-КФС.

Физическую F подсистему социо-КФС можно представить в виде:

$$\Gamma_{\Phi 1} : A \rightarrow \xi^R,$$

обеспечивающего отображение множества образов источника $\langle A \rangle$ во множество состояний $\langle R \rangle^{\xi^R}$ ресурса R , и

$$\Gamma_{\Phi 2} : \xi^R \rightarrow B,$$

обеспечивающего отображение множества состояний $\langle R \rangle^{\xi^R}$ в множество образов потребителя $\langle B \rangle$ при обеспечении требуемой точности отображений. Очевидно, что для физической подсистемы ошибки преобразования связаны с потерей ресурсов (как правило, энергии).

Аналогично, для транспортной T подсистемы справедлива пара отображений

$$\Gamma_{T1} : A \rightarrow \xi^R; \Gamma_{T2} : \xi^R \rightarrow B,$$

обеспечивающие точную передачу ресурса независимо от расположения источника A и потребителя B . Следует отметить, что на физическом уровне ресурсы транспортируются в виде электрических сигналов.

Информационную I подсистему социо-КФС можно представить в виде:

$$\left\{ I, \xi^I, \langle I \rangle^{\xi^I}, P, \xi^P, \left\langle \langle I \rangle^{\xi^I} \right\rangle^{\xi^P} \right\},$$

где I, ξ^I – сущность и тезаурус информационной подсистемы соответственно; P, ξ^P – пользователь социо-КФС и его тезаурус; $\langle I \rangle^{\xi^I}, \left\langle \langle I \rangle^{\xi^I} \right\rangle^{\xi^P}$ – множества представлений и образов (в тезаурусе пользователя) информационной подсистемы.

Аналогично, когнитивную C подсистему социо-КФС можно представить в виде:

$$\left\{ C, \xi^C, \langle C \rangle^{\xi^C}, P, \xi^P, \left\langle \langle C \rangle^{\xi^C} \right\rangle^{\xi^P} \right\},$$

где C, ξ^C – сущность и тезаурус когнитивной подсистемы соответственно; $\langle C \rangle^{\xi^C}, \left\langle \langle C \rangle^{\xi^C} \right\rangle^{\xi^P}$ – множества представлений и образов (в тезаурусе пользователя) когнитивной подсистемы.



С учетом введенного терминологического аппарата и выражений (1)–(4) социо-КФС можно определить как совокупность сущностей ее подсистем:

$$\left\{ P, \xi^P, I, \xi^I, \langle I \rangle^{\xi^I}, \langle \langle I \rangle^{\xi^I} \rangle^{\xi^P}, C, \xi^C, \langle C \rangle^{\xi^C}, \langle \langle C \rangle^{\xi^C} \rangle^{\xi^P}, R, \xi^R, \langle R \rangle^{\xi^R}, \Gamma_{\Phi 1}, \Gamma_{\Phi 2}, \Gamma_{T1}, \Gamma_{T2} \right\}.$$

Ее ключевыми свойствами являются:

- распределенность информации, последняя находится вне социо-КФС (у пользователя) и внутри нее;
- интерактивность – пользователь P влияет на функционирование системы, находясь вне ее и генерируя основные потоки данных;
- территориальная распределенность, обуславливающая высокие требования к последовательности отображений Γ_{T1}, Γ_{T2} .

Описание основных задач в области проектирования социо-КФС

Представленное формальное описание модели социо-КФС позволяет рассмотреть основные задачи проектирования и оптимизации характеристик социо-КФС в терминах, введенных выше.

1. Повышение надежности социо-КФС, применение которых прогнозируется в критически важных областях, таких как здравоохранение населения, транспортная и энергетическая инфраструктура государства, его безопасность, оборона и многих других. Основной вклад в надежность всей системы вносит ее физический компонент F , поскольку включает в себя сенсорную сеть и совокупность исполнительных устройств, обеспечивающих взаимодействие с пользователем P . Физическая подсистема F должна обеспечивать функционирование всей социо-КФС в условиях воздействия внутренних и внешних дестабилизирующих факторов.

2. Эффективная обработка больших объемов гетерогенных данных в режиме реального времени [Котенко, Саенко, Кушнеревич, 2018] может быть обеспечена за счет оптимизации отображений $\Gamma_{\Phi 1}, \Gamma_{\Phi 2}, \Gamma_{T1}, \Gamma_{T2}$ и тезаурусов ξ^I, ξ^C, ξ^R . Учитывая некоторую иерархичность подсистем социо-КФС (рис. 2), значительная роль в решении данной задачи отводится минимизации мощности множества состояний $\langle R \rangle^{\xi^R}$ ресурса R (фактически – минимизации данных, передаваемых внутри системы) и повышению эффективности обработки информации, поступающей от пользователя R :

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{\Gamma_1} \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^P} \xrightarrow{\Gamma_{T1}} \langle R \rangle^{\xi^R} \xrightarrow{\Gamma_{T2}} \langle \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^P} \rangle^{\xi^I}.$$

3. Обеспечение информационной безопасности, под которой следует понимать не только защиту передаваемых персональных данных пользователя P , как статических (пол, рост, вес, возраст и т. д.), так и динамических (психофизическое, физиологическое, эмоциональные состояния), но и безопасность коммуникаций. В первом случае, как правило, применяются криптографические методы защиты информации [Молдовян, Молдовян, 2018; ГОСТ Р 34.12–2015], суть которых с использованием предложенной методологии описания можно представить следующим образом:

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{\Gamma_{K1}} \langle C \rangle^{\xi^C} \xrightarrow{\Gamma_{K2}} \langle \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^C} \rangle^{\xi^B},$$

где Γ_{K1}, Γ_{K2} – отображения прямого и обратного криптографического преобразования.

Во втором случае может применяться стеганографическая защита информации [Рябко, Фионов, 2010], передаваемой посредством транспортной подсистемы социо-КФС, подразумевающей передачу информации от источника к потребителю с помощью контейнера $\langle S \rangle$:

$$\Gamma_{T1} : (A, S) \rightarrow \xi^R; \Gamma_{T2} : \xi^R \rightarrow (B, S).$$

Социо-КФС расширяют масштаб и объем взаимодействия между своими подсистемами и внешним «миром», что усложняет задачи обеспечения безопасности. Существующие методы криптографической и стеганографической защиты информации и других ресурсов социо-КФС становятся неэффективными в условиях обработки и передачи больших объемов гетерогенных данных в режиме реального времени и требуют поиска новых решений.

Заключение

Современные социо-КФС представляют собой совокупность четырех взаимосвязанных компонент: физического, транспортного, информационного и когнитивного, образованных в результате эволюционного развития и конвергенции «Интернета вещей», полимодальных и робототехнических систем. В работе представлены концептуальная и формальная модели социо-КФС, позволившие определить ее ключевые свойства: распределенность информации, интерактивность и территориальную распределенность. На основе введенного терминологического базиса сформулированы и формализованы основные задачи проектирования и оптимизации характеристик социо-КФС. К ним отнесены:

- 1) повышение надежности социо-КФС, основной вклад в которую вносит ее физический компонент F ;
- 2) эффективная обработка больших объемов гетерогенных данных в режиме реального времени за счет минимизации мощности множества состояний $\langle R \rangle^{\xi^R}$ ресурса R и оптимизации обработки информации, поступающей от пользователя.
- 3) обеспечение защиты передаваемых статистических и динамических персональных данных пользователя P и безопасности коммуникаций.

Решение указанных задач в условиях расширения масштаба и объема взаимодействия социо-КФС между своими подсистемами и внешним «миром» позволит с единых методологических позиций выработать подход к построению социо-КФС для различных областей применения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проекты № 18-07-00380, № 19-07-00832), частичной финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (грант 08-08).

Список литературы

1. ГОСТ Р 34.12–2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры.
2. Котенко И.В., Саенко И.Б., Кушнеревич А.Г. 2018. Архитектура системы параллельной обработки больших данных для мониторинга безопасности сетей Интернета вещей. Труды СПИИРАН. 4(59), pp. 5–30. doi:10.15622/sp.59.1
3. Молдовян А.А., Молдовян Н.А. 2018. Способы и алгоритмы псевдовероятностного шифрования с разделяемым ключом. Труды СПИИРАН. 6(61): 119–146.
4. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. 2018. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов. Труды СПИИРАН. 5(60): 39–63.



5. Rogozinsky G.G. Multidomain approach and models of cyber-physical objects in information representation systems. *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi*. T. 3. 4: 88–93.
6. Ronzhin A.L., Basov O.O., Sokolov B.V., Yusupov R.M. 2016. Conceptual and formal models of synthesis of cyber-physical systems and cyber-physical intellectual spaces. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*. T. 59. 11: 897–905.
7. Ryabko B.Ya., Fionov A.N. 2010. *Osnovy sovremennoj kriptografii i steganografii*. M.: Goryachaya liniya – Telekom. 232.
8. Smirnov A.V., Levashova T.V. 2017. Acquisition of knowledge in socio-cyber-physical systems in the process of information resource interaction. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 6: 113–122.
9. Sotnikov A.D., Katsasonova G.P. 2015. Models of applied and socially-oriented information communication systems. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2: 6070–6077.
10. Agah A. 2001. Human Interactions with Intelligent Systems: Research Taxonomy. *Computer and Electrical Engineering*. Vol. 27: 71–107.
11. Antsaklis P. 2014. Goals and Challenges in Cyber-Physical Systems Research. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 59. No. 9: 3117–3119.
12. Basov O., Kipyatkova I., Saveliev A. 2017. Multimodal subscriber interfaces for infocommunication systems. *Computing and Informatics*. Vol. 36. No. 4: 908–924.
13. Basov O.O. 2017. Principles of constructing polymodal infocommunication systems for information space user service. *11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017)*: 70–75.
14. Horvath I., Gerritsen B.H.M. 2012. Cyber-Physical Systems: Concepts, Technologies and Implementation Principles. *Proceedings of TMCE*. Vol. 1: 7–11.
15. Internet of Things, IoT European Research Cluster. Available at: http://www.internet-of-things-research.eu/about_iiot.htm.
16. ITU-T, Recommendation Y.100, Y.101, Y.110:1998. General overview of the Global Information Infrastructure standards development. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en>.
17. Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W. 2011. Cyber-physical-social Systems for Command and Control. *IEEE Intelligent Systems*: 92–96.
18. Motienko A., Basov O., Dorozhko I., Tarasov A. 2016. Proactive robotic systems for effective rescuing sufferers. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham. Vol. 9812: 172–180.
19. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. 2016. Conceptual Model of Cyberphysical Environment Based on Collaborative Work of Distributed Means and Mobile Robots. *Interactive Collaborative Robotics, First International Conference ICR*. Budapest, Hungary. August 24–26. Springer International Publishing, LNAI 9812: 32–39.

References

1. State Standard R 34.12–2015. Information technology. Cryptographic protection of information. Block ciphers.
2. Kotenko I.V., Saenko I.B., Kushnerevich A.G. 2018. Architecture of the Parallel Big Data Processing System for Security Monitoring of Internet of Things Networks. *Trudy SPIIRAN*. Vol. 4. No. 59: 5–30.
3. Moldovyan A.A., Moldovyan N.A. 2018. Methods and Algorithms for Pseudo-probabilistic Encryption with Shared Key. *Trudy SPIIRAN*. Vol. 6(61): 119–146.
4. Pshikhopov V.K., Medvedev M.Y. 2018. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes. *Trudy SPIIRAN*. Vol. 5. No. 60: 39–63 (in Russian).
5. Rogozinsky G. 2017. Multi-Domain Approach and Models of Cyber-Physical Objects in Information Representation Systems. *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi*. T. 3. Vol. 4: 88–93.
6. Ronzhin A.L., Basov O.O., Sokolov B.V., Yusupov R.M. 2016. Conceptual and formal models of synthesis of cyber-physical systems and cyber-physical intellectual spaces. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. Vol. 59. No. 11: 897–905.
7. Ryabko B.Ya., Fionov A.N. 2010. *Osnovy sovremennoj kriptografii i steganografii* [Fundamentals of modern cryptography and steganography]. M.: Goryachaya liniya – Telekom. 232.

8. Smirnov A.V., Levashova T.V. 2017. Knowledge Acquisition in Socio-CyberPhysical Systems through Information Exchange between Resources. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*. No. 6: 113–122 (in Russian).
9. Sotnikov A.D., Katasonova G.R. 2015. Modeli prikladnykh i sotsial'no-orientirovannykh infokommunikatsionnykh system [Models of applied and socially-oriented infocommunication systems]. *Fundamental'nye issledovaniya*. No 2: 6070–6077.
10. Agah A. 2001. Human Interactions with Intelligent Systems: Research Taxonomy. *Computer and Electrical Engineering*. Vol. 27: 71–107.
11. Antsaklis P. 2014. Goals and Challenges in Cyber-Physical Systems Research. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 59. No. 9: 3117–3119.
12. Basov O., Kipyatkova I., Saveliev A. 2017. Multimodal subscriber interfaces for infocommunication systems. *Computing and Informatics*. Vol. 36. No. 4: 908–924.
13. Basov O.O. 2017. Principles of constructing polymodal infocommunication systems for information space user service. 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017): 70–75.
14. Horvath I., Gerritsen B.H.M. 2012. Cyber-Physical Systems: Concepts, Technologies and Implementation Principles. *Proceedings of TMCE*. Vol. 1: 7–11.
15. Internet of Things, IoT European Research Cluster. Available at: http://www.internet-of-things-research.eu/about_iiot.htm.
16. ITU-T, Recommendation Y.100, Y.101, Y.110:1998. General overview of the Global Information Infrastructure standards development. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y/en>.
17. Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W. 2011. Cyber-physical-social Systems for Command and Control. *IEEE Intelligent Systems*: 92–96.
18. Motienko A., Basov O., Dorozhko I., Tarasov A. 2016. Proactive robotic systems for effective rescuing sufferers. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham. Vol. 9812: 172–180.
19. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. 2016. Conceptual Model of Cyberphysical Environment Based on Collaborative Work of Distributed Means and Mobile Robots. *Interactive Collaborative Robotics, First International Conference ICR*. Budapest, Hungary. August 24–26. Springer International Publishing, LNAI 9812: 32–39.

Ссылка для цитирования статьи **Reference to article**

Смирнов А.В., Безручко В.В., Басов О.О. 2019. Теоретические основы построения социкиберфизических систем. *Научные ведомости Белгородского государственного университета*. Серия: Экономика. Информатика. 46 (3): 532–539. DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-532-539.

Smirnov A.V., Bezrzhko V.V., Basov O.O. 2019. Theoretical bases of the construction of cyber-physical system development. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*. 46 (3): 532–539 (in Russian). DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-532-539.