
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 004.942

DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Б. В. СОКОЛОВ*, В. В. ЗАХАРОВ Д. В.

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
sokolov_boris@inbox.ru

Аннотация. В текущих условиях одним из перспективных направлений исследований в информационно-технологической сфере является создание и повсеместное применение интегрированных систем поддержки принятия решений при проактивном (упреждающем) управлении сложными объектами (СЛО) на базе комплексного согласованного использования цифровых двойников (ЦД) указанных объектов и ЦД, описывающих процесс реализации этапов их жизненного цикла. В рамках подобного подхода, как показывает анализ, удается находить оптимальные (эталонные) параметры, программы и законы проактивного управления СЛО, робастность и устойчивость которых можно гарантированно проверить и обеспечить с помощью данных ЦД. К настоящему времени разработано большое количество ЦД объектов и процессов для различных предметных областей. Однако процессы создания и использования ЦД СЛО синтезируются в большинстве случаев на эвристической базе из-за отсутствия соответствующих научных основ. Показано, как, используя системно-кибернетическую интерпретацию процессов управления жизненным циклом ЦД СЛО, можно сформировать методологические основы соответствующей теории. Описаны методология и технологии создания и использования ЦД СЛО применительно к распределенным комплексам киберфизических систем.

Ключевые слова: киберфизические системы, цифровые двойники и нити, разработка и использование цифровых двойников, управление параметрами и структурами цифровых двойников

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00301.

Ссылка для цитирования: Соколов Б. В., Захаров В. В. Методологические основы создания и использования цифровых двойников сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 916—919. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE CREATION AND USE OF DIGITAL TWINS OF COMPLEX OBJECTS

B. V. Sokolov*, V. V. Zakharov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
sokolov_boris@inbox.ru

Abstract. In the current conditions, one of the promising areas of research in the IT-domain is the creation and widespread use of integrated decision support systems for proactive management of complex objects based on the integrated coordinated use of digital twins of these objects describing the process of implementing the stages of their life cycle. According to presented analysis, within the framework of such an approach it is possible to find optimal (reference) parameters, programs, and laws of practical management of the complex object, and it may be guaranteed that their robustness and stability can be checked and ensured using data from the digital twin. To date, a large number of digital objects and processes have been developed for various subject areas. However, the processes of creating and using the digital twins of complex objects are synthesized in most cases on a heuristic basis due to the lack of appropriate scientific foundations. It is shown how, using the system-cybernetic interpretation of the processes of managing the

life cycle of the digital twin of complex object, it is possible to form a methodological foundation of the corresponding theory. The methodology and technologies for the creation and use of digital twins of complex objects with respect to distributed complexes of cyber-physical systems are described.

Keywords: cyber-physical systems, digital twins and threads, development and use of digital twins, control of parameters and structures of digital twins

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00301.

For citation: Sokolov B. V., Zakharov V. V. Methodological foundations for the creation and use of digital twins of complex objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 916—919 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919.

Введение. Согласно ГОСТ 57700.37–2021, цифровой двойник (ЦД) — это система, состоящая из цифровой модели изделия и *двусторонних связей* с изделием и (или) его составными частями* К настоящему времени развитие парадигмы Индустрии 4.0 предопределило многовариантность сфер их применения: ситуативное планирование ремонта и сервисного технического обслуживания элементов и подсистем сложных объектов (СЛО); прогнозирование и парирование расчетных и нерасчетных сбоев и отказов в них; планирование процессов функционирования киберфизических систем (КФС), а также территориально распределенное управление ими; решение различных прикладных задач потребителей на различных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) и т.д. [1].

Анализ литературы показывает, что в настоящий момент времени объектами исследований многих научных групп являются разнообразные структуры унифицированных типовых модулей ЦД, которые могут быть использованы при их разработке. Так, например, компания Siemens, говоря о ЦД, выделяет ЦД производимого (эксплуатируемого) продукта (СЛО), ЦД производственного процесса, ЦД процесса эксплуатации, использующего данные как о реальном продукте, так и о реальных процессах. Комбинация и интеграция всех трех ЦД, когда они развиваются вместе, называется цифровой нитью (ЦН) [2]. Термин (концепт) „нить“ используется для того, чтобы показать, как с его помощью обеспечиваются объединение и интеграция всех данных, информации и знаний о СЛО и его ЦД на всех этапах их ЖЦ. В множестве современных работ описываются фреймворки для создания ЦД, однако предлагаемые решения не имеют необходимого научного обоснования и являются набором практических (эвристических) рекомендаций [1, 2]. Существенно подчеркнуть: несмотря на хорошие перспективы применения ЦД, некоторые авторы указывают на ограничения данного подхода. К ним относятся: отсутствие *убедительных* примеров, показывающих на практике эффект от *использования* ЦД; сложность единообразного математического описания материальных и информационных процессов, протекающих в КФС на различных этапах ЖЦ. Во многом, по нашему мнению, это связано, во-первых, с тем, что операции, связанные с функционированием КФС и их ЦД, имеют в большинстве случаев не детерминированный, а вероятностно-стохастический и/или нечетко-возможностный характер, а, во-вторых, структуры КФС (ЦД) (техническая, информационная, топологическая и т.д.), как показывает практика, динамичны и изменчивы (наблюдается структурная динамика) [3, 4].

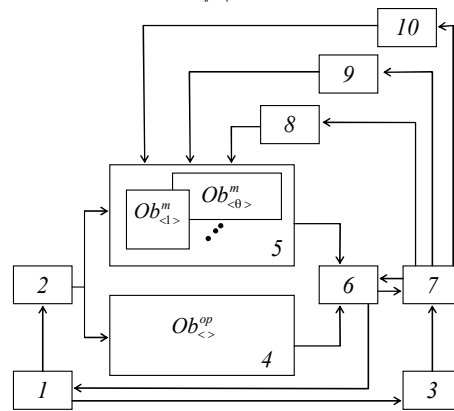
Таким образом, в текущих условиях особую значимость приобретает научная задача разработки прикладной теории синтеза технологий и программ управления созданием и функционированием ЦД, и ее применения для решения задач системного моделирования и управления КФС в целях повышения качества их функционирования на различных этапах ЖЦ.

Методологические основы создания и использования ЦД. Всесторонний анализ подходов к формированию прикладной теории ЦД показал, что в качестве ее научных основ следует принять фундаментальные и прикладные результаты, полученные в теории проактивного управления структурной динамикой СЛО, а также теории многокритериального оценивания

* ГОСТ Р 57700.37-2021.. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий.

качества моделей и полимодельных комплексов (ПМК) (квалиметрия моделей и ПМК) [3, 4]. При этом базовыми для теории ЦД должны быть концепции комплексного предсказательного моделирования, проактивного принятия решений, интеллектуализации управления. В качестве основного объекта исследования теории должен быть выбран не ЦД, а развивающаяся ситуация (РС), описывающая субъекта либо субъектов ($S_{<>}^m$), в чьих интересах создается ЦД, объект-оригинал ($Ob_{<>}^{op}$) — в нашем случае это некоторый СлО, объект-модель, или сам ЦД, а также среду ($CP_{<>}^m$), которая посредством внешних и/или внутренних возмущающих воздействий оказывает влияние на СлО и его ЦД; и помимо того, бинарные отношения между перечисленными элементами [4]. Так как процесс создания и использования ЦД (процесс моделирования) является целенаправленным, то авторы статьи предлагают рассматривать его с системно-кибернетических позиций, а само моделирование описывать в терминах теории проактивного управления РС.

На рисунке представлена обобщенная технология реализации данного вида управления [4]. На рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 — формирование целей функционирования $Ob_{<>}^{op}$; 2 — формирование входных воздействий; 3 — формирование целей моделирования создания и использования ЦД; 4 — моделируемая система (объект $Ob_{<>}^{op}$); 5 — модели ($Ob_{<0>}^m$) — ЦД — исследуемой системы $Ob_{<>}^{op}$; 6 — оценивание и анализ качества ЦД (полимодельных комплексов ЦД) на основе сбора и обработки данных и информации, получаемых от $Ob_{<>}^{op}$ и $Ob_{<0>}^m$; 7 — управление качеством ЦД и процессами моделирования на основе решения задач в блоке 6; 8 — управление параметрами ЦД; 9 — управление структурами ЦД; 10 — изменение концепции описания ЦД.



В целом каждый вариант реализации той или иной технологии создания и использования ЦД СлО характеризуется своими затратами времени на моделирование, расходом различных видов ресурсов и, наконец, своими конечными результатами (эффектами). В этих условиях большой интерес представляют вопросы оценивания и выбора наилучших (в некотором смысле) вариантов технологий синтеза ЦД. Можно использовать результаты современной теории эффективности целенаправленных процессов на конструктивном уровне для оценивания, анализа и многокритериального выбора наиболее предпочтительных технологий создания и использования ЦД СлО с точки зрения их результативности, ресурсоемкости, оперативности [5—8].

Заключение. В статье показано, что на каждом этапе жизненного цикла киберфизических систем и их цифровых двойников остро необходима теория, которая позволила бы перейти от широко использующихся на практике эвристических рекомендаций, дорожных карт и фреймворков к формально обоснованным подходам и системным инструментам, которые позволят управлять созданием и использованием цифрового двойника сложного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // Intern. Symp. on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). Orlando, FL, USA, 6 May 2008. P. 245—257.
2. What is a digital twin? [Электронный ресурс]: <<https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>>. (28.05.2020).
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные информационные технологии управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 408 с.
4. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 тт. / Под ред. Б. С. Авдеевского и др. М.: Машиностроение, 1988. Т. 3.
6. Correa F. R. Cyber-physical systems for construction industry // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). St. Petersburg, 2018. P. 392—397.
7. Tomiyama T., Moyon F. Resilient architecture for cyber-physical production systems // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2018. Vol. 67, N 1. P. 161—164.
8. Соколов Б. В., Ковалев А. П., Мустафин Н. Г., Захаров В. В., Щербакова Е. Е. Методологические основы проактивного управления социоконвергентными системами // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 12. С. 1018—1021.

Сведения об авторах

Борис Владимирович Соколов

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Валерий Вячеславович Захаров

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. научный сотрудник; E-mail: valeriov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Lee E.A. *International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, May 6, 2008, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 245–257.
2. *What is a digital twin?*, <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye informatsionnyye tekhnologii upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Information Technologies for Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 408 p. (in Russ.)
4. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
5. Avduyevskiy B.S. et al., ed., *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike* (Reliability and Efficiency in Engineering), Handbook in 10 Volumes, Moscow, 1988, vol. 3. (in Russ.)
6. Correa F.R. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, St. Petersburg, 2018, pp. 392–397.
7. Tomiyama T., Moyon F. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2018, no. 1(67), pp. 161–164.
8. Sokolov B.V., Kovalev A.P., Mustafin N.G., Zakharov V.V., Shcherbakova E.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 12(64), pp. 1018–1021. (in Russ.)

Data on authors

Boris V. Sokolov

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Valery V. Zakharov

— PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher; E-mail: valeriov@yandex.ru

Received 30.08.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.