

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Шишкин А.В., руководитель отдела отказобезопасности АО «Туполев», преподаватель кафедры 104 «Технологическое проектирование и управление качеством», МАИ (национальный исследовательский университет)

Технология цифровых двойников позволяет объединять всю информацию об объекте и обеспечивать обмен данными между различными этапами жизненного цикла (ЖЦ) сложной авиационной техники. Предлагается исследовать вопросы комплексирования частных задач, решаемых на этапах ЖЦ воздушных судов (ВС) в структуру общего цифрового двойника, выделив этап эксплуатации с целью продления срока службы ВС и обеспечения безопасной его эксплуатации. Рассматриваются вопросы интеграции инфологических моделей на базе цифровых двойников. Формулируются требования цифровому двойнику этапа эксплуатации. Предложены обобщенные математические модели для описания цифрового двойника на концептуальном уровне.

Ключевые слова: структура изделия, цифровой двойник, эффективность, моделирование, эксплуатация, автоматизация, этапы жизненного цикла, аналитика данных.

Цитирование: Шишкин А.В. Концепция формирования цифрового двойника для эксплуатации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 4 (85). С. 108–113.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия сталкиваются с необходимостью повышения эффективности эксплуатации оборудования, снижения затрат на техническое обслуживание и повышения надежности систем. В этих целях активно внедряются концепции цифровизации и моделирования реальных объектов. Одним из ключевых инструментов является цифровой двойник – виртуальная реплика физического объекта или системы, которая позволяет осуществлять мониторинг, диагностику и прогнозирование состояния в реальном времени, в процессе жизненного цикла (ЖЦ) изделия [1, 2].

Аэрокосмическая промышленность, включая ее производственную базу, является одним из тех, кто активно использует цифровые двойники (далее DT – от Digital Twin), проявляя беспрецедентный интерес к их проектированию, разработке и внедрению в более широкие сферы деятельности и в критически важные функции [3]. Постепенно, но уверенно, DT и их технологии внедряются в космических системах [4], беспилотных летательных аппаратах, военной и коммерческой авиации, охватывая функции от производства наукоемких изделий (например, двигателей большой тяги)¹ до обнаружения аномалий, а также управления активами и самолетным парком. Внедрение DT нацелено на конкретные задачи продления эксплуатационных характеристик авиационной техники, обеспечение безопасно-

сти полетов, а также для задач построения авиатренажных систем [5] при подготовке авиадиспетчеров, пилотов², сокращение экономических затрат. Например, в режиме реального времени можно проводить оценку, диагностику и прогнозирование состояния системы более точно, чем при использовании традиционных методов. Ориентация мирового цифрового технологического рынка на цифровые двойники [6] как одно из перспективных направлений развития информационных технологий также говорит само за себя.

По существу, цифровые двойники выступают основным связующим звеном междисциплинарных исследований на основе информационных технологий между существующим технологическим комплексом сложной технической системы, в качестве которого можно рассматривать воздушное судно в целом, и потоками больших данных в составе проектных испытательных, эксплуатационных данных, что представлено на рис. 1. Предварительные знания – это все доступные исследователю знания, которые могут применяться при разработке аналитических моделей, имитационных моделей, алгоритмов переработки данных, включая обработку, представление и передачу данных. Цифровой двойник – это интегрированная система, которая способна моделировать, отслеживать, вычислять, регулировать или контролировать состояние или технологический процесс. Отображение виртуальной реальности строится на основе интеллектуального управления данными в ходе их сбора, передачи и анализа [7].

¹ Ростех внедряет технологию виртуальной реальности в российском двигателестроении. – URL: <https://unitcode.ru/blog/tsifrovye-dvojniki-v-aviakompanijah> (дата обращения: 13.06.2025).

² Колесникова А. Цифровые двойники. Сайт Unitcode.ru [Электронный ресурс] – URL: <https://tass.ru/ekonomika/6882930> (дата обращения: 13.06.2025).



Рис. 1. Место цифрового двойника в технологической среде

Если имитационные модели обычно не выигрывают от наличия данных в реальном времени, то DT созданы для двусторонних потоков данных: от датчиков объекта к системному процессору и в обратном направлении, когда управляющие воздействия передаются исходному объекту – источнику данных [7]. Данное представление актуально для сетевых структур межсредовых высокотехнологичных специализированных платформ мозаичного типа [8].

Существующие вычислительные мощности позволяют строить и реализовывать сложные имитационные модели, объединяющие частные отдельные модели различных подсистем проектирования конструкций, с целью точного моделирования поведения системы в целом. Такие модели со сверхвысокой точностью и легли в основу понятия «цифровой двойника». В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021³ цифровой двойник изделия – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и его составными частями. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия. В большинстве случаев это ряд независимых задач, решаемых на этапах ЖЦ изделия (проектирования, испытания и др.). В работе предлагается исследовать вопросы комплексирования частных задач, решаемых на этапах ЖЦ воздушных судов (ВС) в структуру общего DT, выделив этап эксплуатации с целью продления срока службы ВС и обеспечения безопасной эксплуатации ВС.

1. ЭТАПЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА И СТРУКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Учитывая требования ГОСТ Р 57700.21–2024 и ПНСТ 928–2024, цифровой двойник имеет этапы жизненного цикла и в данном случае рассмотрен как совокупность цифровых двойников, которые одновременно и являются уже этапами цифрового процесса жизненного цикла, где на ка-

ждом этапе цифровой двойник ориентирован на выполнение своих функций и задач этапы представлены на рис. 2.

Цифровой двойник для разработки (DT_1) – это модель, содержащая и отображающая все исходные параметры и данные, используемые для разработки изделия. Он включает технические характеристики, материалы, геометрические размеры, требования и другие исходные сведения, необходимые для создания и анализа цифрового двойника. Это обеспечивает точность моделирования и позволяет легко управлять исходной информацией в процессе разработки.

Цифровой двойник технологический (DT_2) – это виртуальная модель, включающая в себя иерархическую структуру, которая декомпозируется до изделия, а также с учетом выполняемых функций в масштабе системы управления этапами ЖЦ, для верификации, валидации и симуляции процессов, происходящих между изделиями или подсистемами.

Цифровой двойник для испытаний (DT_3) – совокупная виртуальная модель изделия, включающая в себя особенности цифровых двойников для разработки и технического обеспечения, позволяющая отработать взаимодействие составных частей или блоков и систем в разных условиях и режимах с учетом перечня поставленных задач и заданных условий.

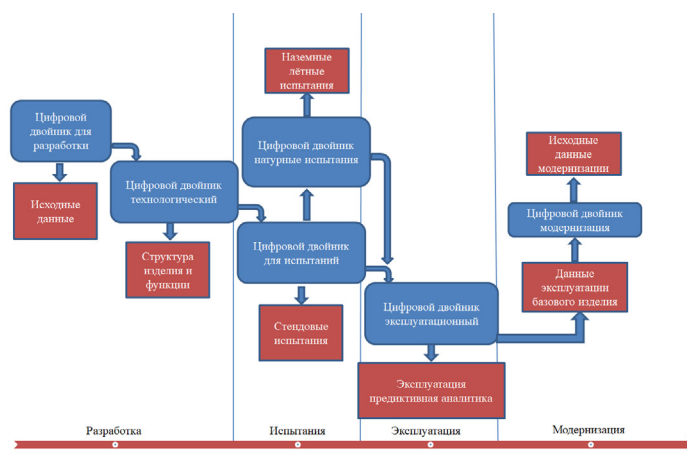


Рис. 2. Основные функции и этапы ЖЦ в формате TD

Цифровой двойник натурные (испытания) (DT_4) – виртуальная модель, полностью повторяющая физическое изделие. Получение информации осуществляется с помощью датчиков, установленных на физическом изделии. В процессе наземных/летных испытаний DT получает данные о поведении изделия и окружающих внешних и внутренних влияющих факторах, такие как: сопротивление, давление и т.д. На основе данной информации устанавливаются критически важные системы и изделия, которым необходимы дополнительные технические средства или методы резервирования.

Цифровой двойник эксплуатационный (DT_5) – виртуальная модель, идентичная с изделием, которое находится в

³ ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. (Дата введения: 2022-01-01).

эксплуатации. Данная модель способна анализировать процессы эксплуатации, разрабатывать планы обслуживания и прогнозировать возникновение аварийных и сложных ситуаций за счет сопоставления параметров и коэффициентов, получаемых из статистики и с изделия, в соответствии с выражением (1):

$$DT_5 = \bigcup_{i=1}^4 DT_i, i = [1,4]. \quad (1)$$

Цифровой двойник на этапе модернизации (DT_6) представляет собой обобщенную виртуальную модель, включающую информацию об аналогичных или базовых изделиях, в том числе историю эксплуатации (DT_5). Также при модернизации учитываются как требования DT_{TP} , так и технологический функционал типа DT_2 , но уже с учетом новых систем и изделий, подвергающихся модернизации-оптимизации или замене в виде:

$$DT_6 = \{\{DT_5\}, DT_{TP}, DT_M\}, \quad (2)$$

где DT_M – технологический функционал, с учетом задач модернизации.

Основным результатом цифрового процесса жизненного цикла, как для изготовителя, так и для заказчика является «эксплуатационный цифровой двойник изделия». Эксплуатационный цифровой двойник изделия является точной копией физического изделия. TD работает в рамках реального времени в процессе эксплуатации. Он служит для прогнозирования, мониторинга и контроля состояния физического изделия. Также цифровой двойник требуется для диагностики проблем и принятия решений по обслуживанию, модернизации или замене изделия.

Отмеченные выше цифровые двойники строятся под конкретные интеллектуальные информационные среды (ИТ-среда), которые в общем виде можно представить в виде совокупности взаимодействующих информационных множеств, представленных на рис. 3 [9]:

$$V_{IT} = \{E, M_c, DT_i\} \cup AP_i, \quad (3)$$

где V_{IT} – информационное пространство, в котором осуществляется работа DT ; E – множество описаний предметной области (требования, стандарты, исходные данные для моделирования и др.); M_c – множество моделей (улов, элементов, комплектующих изделий) в составе базы данных и знаний для формирования DT на i -м этапе ЖЦ; AP_i – соответствующие аппаратно-программные средства (инструментарий). Формируемая на основе базы данных и знаний информация D_i , обеспечивает информационную поддержку для лиц, принимающих решение (ЛПР) по управлению цифровыми двойниками в ходе их применения.

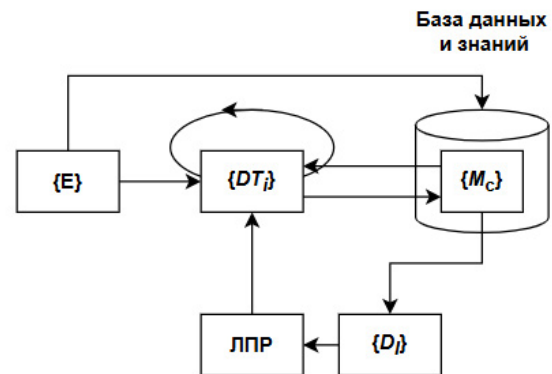


Рис. 3. Схема технологии информационной поддержки при принятии решений на основе цифровых двойников

Таким образом, интеллектуальная ИТ-среда (3) включает пространство знаний, интегрирующее модели знаний и данных предметной области исследований ЭБ, имитационные модели (программы испытаний, планы эксплуатации и послеполюетного обслуживания техники в виде событийных моделей), а также иные инструментальные средства.

2. СТРУКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Структура эксплуатационного цифрового двойника представлена на рис. 4. Структура включает в себя входные данные, блоки, связанные с обработкой данных, и результаты, оптимально демонстрирующие принятие решений для формирования плана (перечня различных мероприятий) технического обслуживания с учетом предиктивной аналитики.

DT должен обладать системой обмена данными, которая будет содержать в себе следующие структуры и блоки в соответствии с видами информации:

- **логистическая информация об изделии** – иерархическая структура самолета, распределяет местонахождение изделия с учетом основных систем и подсистем самолета;
- **функциональная информация изделия** – перечень и виды функции, которые присущи каждому изделию, агрегату или блоку, на основе совокупности функций изделий и составных частей определяется весь функционал системы;
- **визуальная информация** – информация, отображающая процессы, происходящие в процессе эксплуатации или работы изделия. Геометрия движения изделия или процесс отклонения о нормы;
- **статистическая параметрическая информация** – перечень данных, связанных с установленными параметрическими показателями, с помощью которых отражается статистика изменения параметров, приводящих к внештатным ситуациям;
- **измерительная информация, поступающая с датчиков реального времени**, – перечень данных, поступающих с датчиков, установленных на изделии для считывания и контроля данных, находящихся в допустимых пределах.

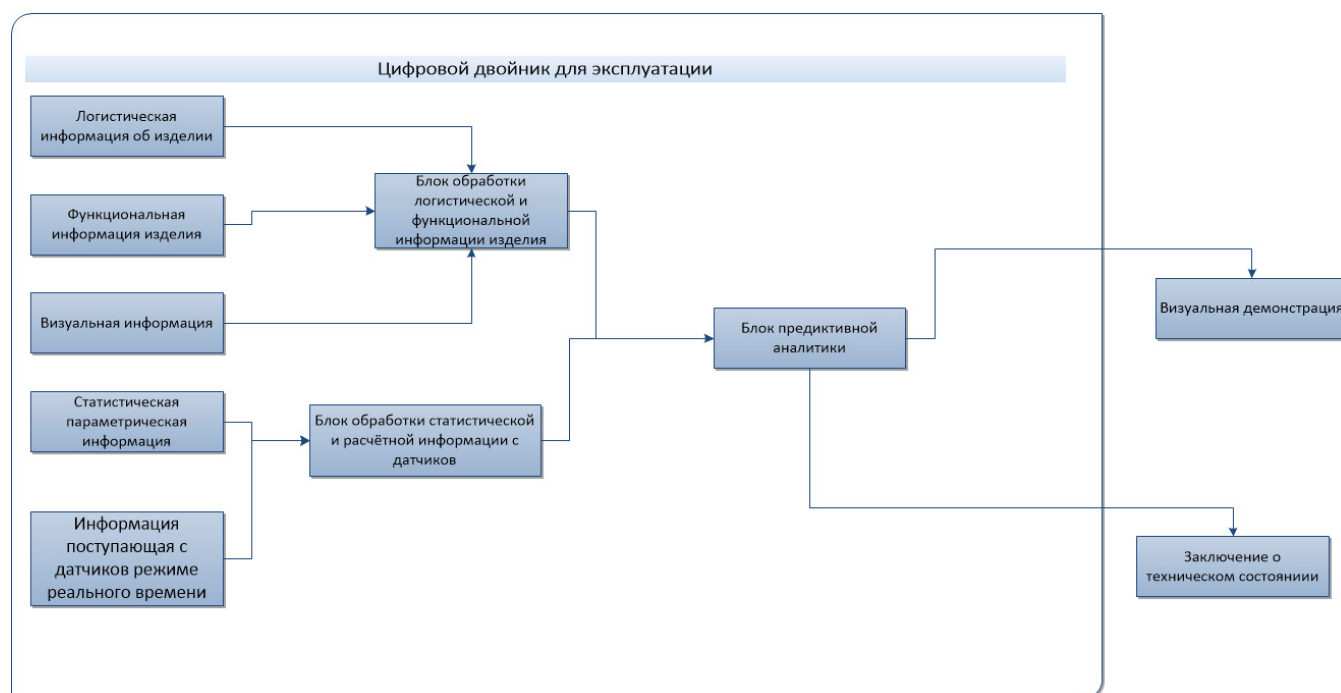


Рис. 4. Структура цифрового двойника эксплуатации

Таким образом, с учетом представленных информационных потоков цифровой двойник будем представлять в виде следующего кортежа данных:

$$DT = \{IM, MP, DB, InS\}, \quad (4)$$

где $IM = \{LM, FM, VM, SM, XM\}$ – типы информационных моделей для соответствующих видов информации (логистической, функциональной, визуальной, статистической, измерительной или входной); MP – имитационные модели процессов; DB – базы данных; InS – инфраструктура, обеспечивающая связь между указанными компонентами.

Блоки обработки информации и результаты работы используются для решения следующих задач:

- **Блок обработки логистической и функциональной информации изделия** – определяется зависимость с помощью математического аппарата между происходящим процессом и функционалом изделия и его местоположением;
- **Блок обработки статистической и расчетной информации** – несет в себе функцию выявления отклонения от заданных норм параметров работы изделия;
- **Блок предиктивной аналитики** – аккумулирует информацию, связанную с изделием (процессом функционирования) и изменением параметров, в результате чего делается прогноз на требуемый период, определяющий величину отклонения параметров, как в абсолютных единицах, так и в графическом (видео) формате.

Получаемые результаты:

Визуальная демонстрация – визуальное изображение, демонстрирующее место возникновения неисправности и изделие с отказавшими функциями или неисправный агрегат.

Заключение о техническом состоянии – результат аналитической работы цифрового двойника, рекомендации по обслуживанию изделия со ссылкой на техническую карту, а также количественные показатели, демонстрирующие предиктивную аналитику возникновения аварийных ситуаций.

Для формализации работы DT математическую модель процесса работы цифрового эксплуатационного двойника на параметрическом уровне будем представлять в виде динамической системы, описываемой зависимостью, связывающей входные (X) и выходные переменные (Y) модели:

$$DT: X \xrightarrow{F} Y, \quad (5)$$

где F – функциональное отображение пространства входных переменных в выходные данные Y . Внутренние параметры DT характеризуются в соответствии с выражением (4), учитывающим как состав, так и возможную структуру элементов и подсистем в виде формализмов (отношений) их взаимодействия.

Структура отображения F для декомпозированного представления DT по этапам жизненного цикла образует последовательность отображений [10]:

$$F: X \rightarrow F_{DT_1} \rightarrow F_{DT_2} \rightarrow \dots \rightarrow F_{DT_6} \rightarrow Y.$$

Результаты в виде выходных данных позволяют судить о качестве управления имитационным экспериментом, выступать рекомендациями для ЛПР.

Построение математической модели заключается в определении связей между теми или иными процессами, отдельными событиями, и создании математического аппарата, позволяющего выразить качественную и количественную связь между интересующими величинами и факторами, влияющими на конечный результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология цифровых двойников рассматривает его как определенный класс виртуальных моделей, наделенный определенным функционалом. Однако поскольку циф-

ровой двойник специализирован и ориентирован на выполнение определенных задач, то в рамках концепции жизненного цикла изделия или программы конкретный цифровой двойник может разрабатываться для круга задач своего этапа ЖЦ. Таким образом, цифровой двойник является не только отлаженной и выстроенной структурой с входными данными, которые будут трансформироваться от этапа к этапу, решая в том числе и задачи предиктивной аналитики (улучшая возможности прогнозирования, расширенной диагностики, комплексного управления жизненным циклом, а также повышения общих эксплуатационных характеристик изделия). Цифровой двойник постепенно обретает новые эмерджентные свойства за счет возможностей системной интеграции, представляя собой новую парадигму информационной среды развивающегося киберфизического пространства.

Список использованных источников и литературы

1. Шишкин А. В. Оптимизация системы технического обеспечения авиационной техники при использовании цифрового двойника изделия // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 4. С. 10–13.
2. Рахманов М.Л., Василенко Г.В., Шишкин А.В. Применение цифрового двойника в эксплуатации авиационной техники // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2023. № 2 (72). С. 48–52.
3. Li L., Aslam S., Wileman A., Perinpanayagam S. Digital twin in aerospace industry: A gentle introduction // IEEE Access. 2021. № 10. Pp. 9543–9562.
4. Самогородская М.И., Бейнар И.А., Наролина Т.С. Особенности цифровой трансформации предприятий авиакосмической отрасли // Регион: системы, экономика, управление. 2020. № 1(48). С. 91–97.
5. Мистров Л.Е., Кучевский К.В., Поляков О.В. Модель и алгоритм логистической поддержки архитектуры интеллектуальной тренажной системы // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 4(79). С. 41–45.
6. Шпак П.С., Сычева Е.Г. Перспективные тренды и прогнозы развития цифровых технологий в авиационной отрасли // Современная экономика: проблемы и решения. 2025. № 1(181). С. 93–106.
7. Бурый А.С. Цифровые двойники как основа парадигмы развития прикладных информационных систем // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 6(70). С. 24–32.
8. Рахманов М.Л., Ганус Ю.А., Шишкин А.В. Применение технологии цифрового двойника для формирования облика платформ мозаичного типа и повышения качества эксплуатации высокотехнологичной техники // Качество и Жизнь. 2023. № 3(39). С. 55–62.
9. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 5. С. 135–140.
10. Бурый А.С. Отказоустойчивые распределенные системы переработки информации. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. – 128 с.

THE CONCEPT OF FORMING A DIGITAL TWIN FOR OPERATION

Shishkin A.V., Head of the Fault Safety Department of JSC Tupolev, Lecturer of the Department 104 «Technological Design and Quality Management», MAI (National Research University)

Digital twin technology allows you to combine all information about an object and provide data exchange between different stages of the life cycle of complex aviation equipment. It is proposed to investigate the issues of integrating specific tasks solved at the stages of the aircraft life cycle into the structure of a common digital twin, highlighting the operational stage in order to extend the service life of the aircraft and ensure its safe operation. The issues of integration of ontological models

based on digital twins are considered. The requirements for the digital twin of the operational stage are formulated. Generalized mathematical models are proposed to describe the digital twin at the conceptual level.

Keywords: product structure, digital twin, efficiency, modeling, operation, automation, life cycle stages, data analytics.

For citation: Shishkin A.V. The concept of forming a digital twin for operation. Information and Economic aspects of standardization and technical regulation. 2025. 4(85): 108–113. (In Russ.).

References

1. Shishkin A.V. Optimization of the system of technical support of aviation equipment using digital double product. Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2024; 4: 10–13. (In Russ.).
2. Rachmanov M.L., Vasilenko G.V., Shishkin A.V. Application of digital binary in aviation equipment. Information-economic aspects of standardization and technical regulation. 2023; 2(72): 48–52. (In Russ.).
3. Li L., Aslam S., Wileman A., Perinpanayagam S. Digital twin in aerospace industry: A gentle introduction. IEEE Access. 2021; 10: 9543–9562.
4. Samogorodskaya M.I., Beinar I.A., Narolina T.S. Features of digital transformation of aerospace enterprises. Region: systems, economy, management. 2020.; 1(48): 91–97. (In Russ.).
5. Mistrov L.E., Kuchevskiy K.V., Polyakov O.V. Model and algorithm of logistic support of architecture of intelligent training system. Information-economic aspects of standardization and technical regulation. 2024; 4(79): 41–45. (In Russ.).
6. Shpak P.S., Sycheva E.G. Promising trends and forecasts of digital technologies in the aviation industry. Modern economy: problems and solutions. 2025; 1(181): 93–106. (In Russ.).
7. Buryi A.S. Digital doubles as the basis of the paradigm of development of applied information systems. Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2022; 6(70): 24–32. (In Russ.).
8. Rachmanov M.L., Ganus Y.A., Shishkin A.V. Application of digital double technology to shape mosaic-type platforms and improve the quality of operation of high-tech equipment. Quality and Life. 2023; 3(39): 55–62. (In Russ.).
9. Massel L.V., Massel A.G. Intellectual calculations in research of energy development. Izvestia Tomsk Polytechnic University. 2012; 321(5): 135–140. (In Russ.).
10. Buryi A.S. Fault-tolerant distributed information processing systems. Moscow: Hotline-Telecom Publ., 2016, 128 p.