

Научная статья
УДК 004.9
doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.003

СИТУАЦИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В УПРАВЛЕНИИ КРИТИЧЕСКИМИ ИНФРАСТРУКТУРАМИ: СПЕЦИФИКАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ

Александр Яковлевич Фридман^{1✉}, Андрей Владимирович Маслобоев²

^{1,2}*Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*fridman@iimm.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2408-6892>*

²*masloboev@iimm.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1231-9225>*

Аннотация

Предложены и обоснованы средства формализации основных технических требований к компьютерным программам-исполнителям (цифровым двойникам) элементов модели критических инфраструктур на примере промышленно-природных комплексов в рамках ранее разработанной ситуационной системы моделирования, ориентированные на ее децентрализованную реализацию в специализированном секторе Интернета, в частности, для решения задач управления жизнеспособностью этих критически важных объектов. Такая спецификация может позволить избежать типичной для компьютерных задач начальной стадии хаотического развития программно-аппаратного обеспечения новых структурных проектов в этой области и ускорить процесс саморазвития, необходимый для эффективного объединения разработок цифровых двойников критически важных объектов и инфраструктур различных типов в рамках единой системы распределенных ситуационных центров.

Ключевые слова:

критическая инфраструктура, промышленно-природный комплекс, ситуационная система моделирования, цифровой двойник, превентивная аналитика безопасности

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема научно-исследовательской работы — «Разработка теоретических и организационно-технических основ информационной поддержки управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур Арктической зоны Российской Федерации» (проект № FMEZ-2022-0023).

Для цитирования:

Фридман А. Я., Маслобоев А. В. Ситуационные цифровые двойники в управлении критическими инфраструктурами: спецификация требований // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 3. С. 41–49. doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.003.

Original article

SITUATIONAL DIGITAL TWINS IN MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURES: SPECIFICATION OF REQUIREMENTS

Alexander Ya. Fridman^{1✉}, Andrey V. Masloboev²

^{1,2}*Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*fridman@iimm.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2408-6892>*

²*masloboev@iimm.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1231-9225>*

Abstract

The main means to formalize technical requirements for software executors (digital twins) of the elements of the critical infrastructure model by the example of industrial-natural complexes within the previously developed situational modeling system, oriented towards its decentralized implementation in a specialized sector of the Internet, specifically, for the problem-solving of resilience management of these critical entities, are proposed and substantiated. Such a specification can help to avoid the initial stage of the chaotic development of software and hardware for new structural projects in this area, which is typical for computer problems, and accelerate the process of self-development necessary to effectively combine the developments of digital twins for critical entities and infrastructures of various types within a unified system of distributed situational centers.

Keywords:

critical infrastructure, industrial-natural complex, situational modeling system, digital twin, preventive safety analytics

Acknowledgments:

the study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic "Development of theoretical and organizational-technical foundations of information support for managing the viability of regional critical infrastructures of the Arctic zone of the Russian Federation" (project No. FMEZ-2022-0023).

For citation:

Fridman A. Ya., Masloboev A. V. Situational digital twins in management of critical infrastructures: specification of requirements // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 41–49. doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.003.

Введение

На сегодняшний день актуальным и перспективным направлением исследований в области ситуационного управления безопасностью и устойчивым функционированием критических инфраструктур является разработка цифровых моделей-двойников гетерогенных групп взаимосвязанных критически важных объектов (комплексов), образующих эти инфраструктуры, для повышения их надежности, защищенности и жизнеспособности. Своевременность данных исследований подтверждается директивными документами [1–3], принятыми на государственном уровне, а также результатами обзорных исследований [4–8], анализирующих российский и зарубежный опыт создания и применения цифровых двойников в различных сферах деятельности. Отечественный аналитический обзор [8] не является исчерпывающим, но обобщает широкий круг вопросов, касающихся внедрения цифровых двойников в критические секторы экономики и промышленности. Согласно работе [8] под цифровым двойником в широком смысле понимается любая цифровая копия (концептуальная, математическая, имитационная или киберфизическая модель, виртуальная или электронная копия и т. д.) живого или неживого объекта, процесса или системы (как правило, с невысоким уровнем адекватности), отражающая по определению наиболее существенные для заданной цели и условий характеристики исследуемого физического объекта или процесса. В реальной практике, особенно в критических приложениях таких, как превентивная аналитика безопасности и управление устойчивостью критических инфраструктур, цифровые двойники представляют собой специализированные модельные или программно-технические решения, которые должны удовлетворять жестким требованиям и критериям в части обеспечения высокого уровня адекватности виртуального объекта реальному физическому объекту.

В исследовании [4] предлагается оригинальная классификация цифровых двойников, основанная на уровнях интеграции данных и взаимодействия цифрового и реального физического объектов. Выделяют три основных типа цифровых двойников [8]: цифровая модель (Digital Model), в рамках которой не существует автоматизированного потока данных между физической и виртуальной составляющей объекта; цифровая тень (Digital Shadow), в рамках которой автоматизирован односторонний поток данных от физического объекта к виртуальному объекту; цифровой двойник (Digital Twin), который предполагает двусторонний обмен информацией между цифровым и реальным объектами.

В данной работе, основываясь на типологии [4], рассматривается спецификация требований к цифровым двойникам для ситуационного управления критическими инфраструктурами на примере промышленно-природных комплексов с использованием ситуационной системы моделирования. Разработанные для формализации и автоматизации управления отдельными компонентами критических инфраструктур ситуационная концептуальная модель и ее расширения, являющиеся ядром системы ситуационного моделирования, находятся на стыке типов цифровая модель (Digital Model) и цифровая тень (Digital Shadow), однако в случае успешной практической реализации могут быть позиционированы, как полноценный цифровой двойник (Digital Twin) для исследуемого класса объектов.

Материалы и методы

В соответствии с работой [4] и аналитическими и экспертными материалами, систематизированными в исследовании [8], цифровая модель — это цифровое представление существующего или проектируемого реального объекта, в рамках которого не реализуется автоматический обмен данными между физическим объектом и его виртуальным аналогом.

Цифровая модель должна включать достаточно точное описание характеристик реального объекта как на концептуальном, так и на формальном (математическом) уровне. Настройка параметров и управление реальным объектом или процессом посредством виртуальной модели осуществляется в ручном режиме, т. е. данные о состоянии физического объекта вводятся в модель вручную. В таком случае изменение параметров состояния реального объекта не имеет прямого эффекта на изменение соответствующих характеристик виртуального объекта. Другой принцип взаимодействия реализован в цифровой тени, который предполагает односторонний автоматический обмен информацией между реальным объектом и виртуальным объектом (данные передаются от реального к виртуальному объекту). Изменение состояния реального объекта ведет к соответствующему изменению виртуального объекта, однако обратная связь отсутствует (данные могут передаваться в ручном режиме). Наконец в истинном цифровом двойнике интегрированные данные передаются как от физического объекта к виртуальному объекту, так и в обратном направлении. В этом случае цифровой объект становится контрольной точкой или образцом для реального объекта. Изменение состояния реального объекта ведет к изменению виртуального объекта и наоборот. Информационное взаимодействие в системе «реальный объект — цифровой объект» для разных типов цифровых двойников схематично проиллюстрировано на рис. 1.

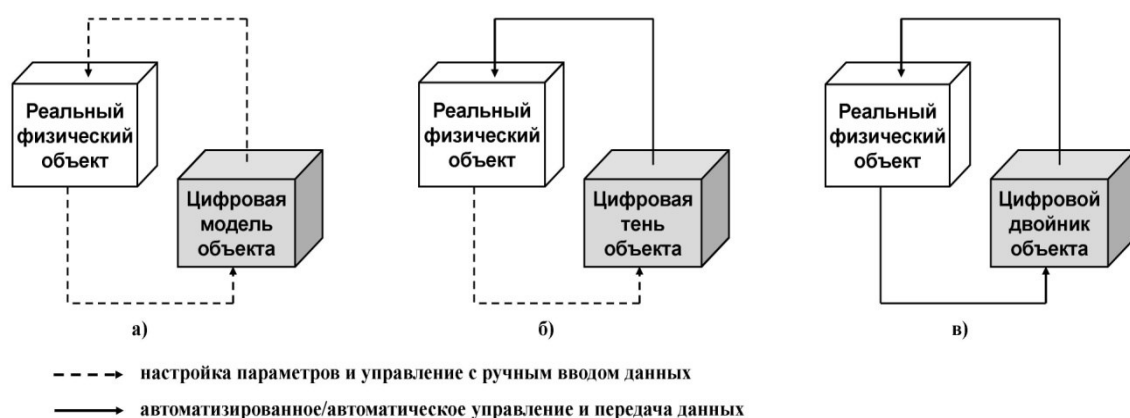


Рис. 1. Поток данных и управления в системе «реальный объект – цифровой объект» [4]:
 а — цифровая модель; б — цифровая тень; в — цифровой двойник

Одна из ключевых возможностей ситуационной системы моделирования (ССМ) [9] состоит в предоставлении средств анализа динамики поведения объектов моделирования, в том числе критических инфраструктур, к которым относятся промышленно-природные комплексы (ППК) — в имитационном режиме, который с математической точки зрения обеспечивает решение задачи Коши для векторного разностного уравнения [10] (уравнения состояния ППК), образованного некоторым набором взаимосвязанных программных модулей. Сами по себе такие модули могут иметь самую различную природу: имитаторы процессов, происходящих внутри объектов — составных частей ППК; поднаборы правил специальной структуры, которые хранятся в экспертной системе (ЭС), встроенной в ССМ; процедуры ввода в имитаторы процессов требуемых для расчетов графических характеристик объектов ППК посредством встроенной ГИС ССМ; процедуры определения приоритетов вызова имитаторов процессов в ходе имитации и т. д. В целях удобства формализации всем элементам модели ППК в ССМ (далее она называется ситуационной концептуальной моделью — СКМ) и моделирует ППК в виде взаимодействующего набора трех типов сущностей: объектов — организационных составных частей ППК; ресурсов, формализующих временные ряды величин потоков информации и материалов внутри СКМ, и процессов, которые содержат модели преобразований ресурсов) вручную или автоматически, в ходе конструирования СКМ, назначаются исполнители (с недавних пор их стали именовать цифровыми двойниками [11]), которые задают особенности компьютерного моделирования этих элементов модели. Для процессов

СКМ исполнители определяют интерфейс программного модуля — имитатора процесса — с подсистемой организации имитационного режима; у ресурсов с помощью исполнителя устанавливается способ получения последовательностей значений этих ресурсов во времени (обращение к соответствующим БД или генераторам значений); исполнитель некоторого объекта агрегирует цифровые двойники процессов, приписанных к этому объекту, и конкретизирует интерфейсы их взаимодействия с ГИС соответственно для использования графических характеристик объекта в расчетах или представления результатов расчетов на электронной карте. Если какие-либо ресурсы или процессы не имеют отдельных исполнителей, их быстрый прототип в рамках парадигмы искусственного интеллекта [12] создается назначением им исполнителя «ЭС», тогда значения этого ресурса или всех выходных ресурсов такого процесса должны вычисляться вызовом некоторого поднабора правил ЭС ССМ.

Каждый шаг имитации состоит в подготовке исходных значений ресурсов и контроле их достаточности для срабатывания динамически формируемого набора исполнителей процессов, вызов которых согласно их текущим приоритетам моделирует одну итерацию решения упомянутого выше уравнения Коши и переводит СКМ из текущего состояния в следующее. Корректно сформированная последовательность шагов имитации на заданном интервале времени реализует некоторый сценарий поведения ППК на этом интервале.

Имитация и интерпретация ее результатов происходит в обобщенном экспертном пространстве моделирования [13], допускающем любые типы переменных состояния, в котором опасные и критические (аварийные) значения переменных состояния располагаются по обе стороны диапазона допустимых значений каждой переменной, что обеспечивает интегральную экспертную оценку степени опасности состояния ППК и позволяет унифицировать методы обработки допустимых и опасных ситуаций, складывающихся в изучаемом ППК, т. е. строить модели нештатных и чрезвычайных ситуаций как расширения моделей нормального функционирования ППК. В общем случае при выходе значения некоторой переменной состояния за ее диапазон безопасных значений может потребоваться замена исполнителя ресурса или процесса, генерирующего значения этой переменной.

Как следует из изложенного, в ССМ применяются специализированные цифровые двойники (далее будем их называть ситуационными цифровыми двойниками — СЦД [14]), технические требования к которым отличаются от общепринятых [11] и кратко сформулированы ниже.

Естественно, основное требование состоит в адекватности СЦД некоторому процессу или объекту заданного ППК по тернарному соответствию «вход-состояние-выход». Здесь особую важность приобретает проблема идентификации начального состояния СЦД для исследуемого сценария. Методы ее решения зависят от типа оператора (передаточной функции) СЦД и должны включаться в программный модуль каждого двойника. Для ядра ССМ более существенна задача интеграции баз данных СЦД. С этой целью предлагается использовать расширенную концептуальную модель (РКМ), разработка которой начата в исследовании [15].

Основное отличие РКМ от СКМ состоит в том, что в РКМ детально проработан аппарат сопровождения характеристик, изменяющихся при проведении имитации. РКМ, как и СКМ, опирается на системные типы элементарных данных {integer, float, string}, но дополнительно описывает форматы представления данных на всех этапах моделирования, что создает основу для автоматической генерации БД СЦД как части системы баз данных моделирования (БДМ). Кроме того, в схеме РКМ явно указаны дополнительные отношения «вход-выход» по всем процессам и ресурсам, задействованным в СЦД, которые наиболее существенны для анализа корректности модели, а значит, и для анализа БДМ.

Далее рассмотрим структуру разработанной РКМ более детально.

Результаты и обсуждение

Как и в СКМ [15], схема РКМ имеет следующий вид:

$$S_{PKM} ::= \langle O, P, R, RP, PR, RO, OR, OA, N \rangle, \quad (1)$$

где O, P — множества элементов (объектов, процессов), определяемые аналогично соответствующим элементам СКМ; R — множество ресурсов (соответствует D^{CM} в СКМ); $N \subseteq O \times B(O)$ — отношения

иерархии объектов $B(*)$ — булеан множества с именем $*$); $RP \subseteq B(R) \times P$ — отношения «процесс — входные данные»; $PR \subseteq P \times B(R)$ — отношения «процесс — выходные данные»; $RO \subseteq B(R) \times O$ — отношения «объект — входные данные»; $OR \subseteq O \times B(R)$ — отношения «объект — выходные данные»; $OA \subseteq O \times B(P)$ — отношения «объект — приписанные к нему процессы».

Отношения, определенные в модели, можно представить в форме следующих функций:

— функция h определяется аналогично соответствующей функции в СКМ;

— $gr: P \rightarrow B(R)$, $\{r_j\} = gr(p_i)$, где p_i — некоторый процесс; $\{r_j\}$ — множество входных данных процесса p_i ($r_j \in gr(p_i)$);

— $pr: P \rightarrow B(R)$, $\{r_j\} = pr(p_i)$, где p_i — некоторый процесс; $\{r_j\}$ — множество выходных данных процесса p_i ($r_j \in pr(p_i)$);

— $go: O \rightarrow B(R)$, $\{r_j\} = go(o_i)$, где o_i — некоторый объект; $\{r_j\}$ — множество входных данных объекта o_i ($r_j \in go(o_i)$);

— $or: O \rightarrow B(R)$, $\{r_j\} = or(o_i)$, где o_i — некоторый объект; $\{r_j\}$ — множество выходных данных объекта o_i ($r_j \in or(o_i)$);

— $oa: O \rightarrow B(P)$, $\{p_j\} = oa(o_i)$, где o_i — некоторый объект, $\{p_j\}$ — процессы, приписанные объекту o_i .

Множества значений функций, соответствующие сечениям областей значений отношений КМПО (ее фрагментов) по некоторому элементу областей их определения, обозначаются жирным цветом. Аналогично обозначаются сечения вводимых отношений по некоторым подмножествам их областей определения, которые определяются как объединения всех сечений по элементам этих подмножеств. Например, $h(O_i)$, где $O_i \subseteq O$ есть множество объектов, доминируемых данным подмножеством объектов $o_j \in O_i$.

Отношения RP , PR , OR , RO служат для назначения входных, а также выходных ресурсов объектам и процессам. Функции gr , pr , or , ro соответствуют функциям $list_in$ и $list_out$ в СКМ, которые можно применить как к объектам, так и к процессам, но не входят в схему КМПО.

Атрибуты, характеризующие элементы КМПО, описываются моделью атрибутов, определяющей структуру таблиц БД КМ. Модель атрибутов РКМ образуется кортежем:

$$A_{PKM} ::= \langle N, T, n, t, E, T_e, n_e, t_e, T_h, t_h, V, rv \rangle, \quad (2)$$

где атрибуты N, T, E, T_e, T_h и функции n, t, n_e, t_e, t_h определяются аналогично соответствующим атрибутам и функциям СКМ; $V ::= \langle V_{int}, V_{float}, V_{str} \rangle$ — множество возможных значений ресурсных связей; V_{int} — множество целочисленных значений; V_{float} — множество вещественных значений; V_{str} — множество строковых значений; функции rv сопоставляют каждому ресурсу множество его возможных значений: $rv ::= \langle rv_{int}, rv_{float}, rv_{str} \rangle$, $rv_{int}: R \rightarrow B(V_{int})$, $rv_{float}: R \rightarrow B(V_{float})$, $rv_{str}: R \rightarrow B(V_{str})$.

Поскольку процесс построения модели включает не только ее формирование, но и выбор интересующего фрагмента, а также его доопределение, то БДМ обязана хранить не только данные, относящиеся ко всей модели, но и данные, специфичные для отдельных ее фрагментов. Далее рассмотрим схемы фрагментов РКМ. Использование фрагментов РКМ, а также их названия совпадают с соответствующими фрагментами СКМ [15].

Концептуальную модель полной ситуации можно представить кортежем:

$$S_{ПС} ::= \langle O', P', R', BV \rangle, \quad (3)$$

где O' — множество объектов полной ситуации ($O' \subseteq O$); P' — множество процессов полной ситуации ($P' \subseteq P$); R' — множество ресурсов полной ситуации ($R' \subseteq R$); $BV \subseteq R' \times rv(R')$ — отношение «ресурс — множество его начальных значений».

Отношение BV представимо в виде набора функций $bv ::= \langle bv_{int}, bv_{float}, bv_{str} \rangle$, где $bv_{int}: R' \rightarrow rv_{int}(R')$, $bv_{float}: R' \rightarrow rv_{float}(R')$, $bv_{str}: R' \rightarrow rv_{str}(R')$.

Концептуальная модель достаточной ситуации имеет вид:

$$S_{ДС} ::= \langle O'', P'', R'', TSet, RS \rangle, \quad (4)$$

где O'' — множество объектов достаточной ситуации ($O'' \subseteq O'$); P'' — множество процессов достаточной ситуации ($P'' \subseteq P'$); R'' — множество ресурсов достаточной ситуации ($R'' \subseteq R'$); $TSet = \{tset_i\}$ — множество временных рядов; $RS \subseteq R'' \times TSet$ — отношение «ресурс достаточной ситуации — временной ряд».

$TSet \subseteq T_1 \times T_2 \times R'' \times rv(R'')$, где $T_1 \subseteq Time$ — моменты фиксации значений; $T_2 \subseteq Time$ — моменты окончания действия значения, зафиксированного в момент T_1 ; $Time$ — множество моментов времени.

Потребность в модификации отношений схемы концептуальной модели при переходе от СКМ к РКМ обусловлена следующим. Для удобства динамического анализа модели (в частности, разрешимости модели) в схеме СКМ присутствуют отношения ОР и РО (соответственно, отношение «объект — порождающие его выходные данные процессы» и отношение «процесс — создающие его входные данные объекты»). Одна из основных задач настоящего подраздела — не разработка новых алгоритмов проверки модели исследуемого объекта, а создание такого представления схемы концептуальной модели, ее фрагментов и ограничений на их отношения (т. е. создание онтологии), которое могло бы лечь в основу процедур семантического анализа БДМ и запросов, адресованных к ней. В связи с этим схема должна содержать все отношения, существенные с точки зрения структурных ограничений. Для анализа структурных ограничений (статический анализ) модели и ее фрагментов в рамках систем на основе концептуального подхода используются шаблоны, проверка корректности которых опирается на анализ ограничений на входы — выходы процессов (объектов) владельцев шаблонов и подчиненных им элементов. Таким образом, представляется целесообразным в РКМ в качестве базовых явно задавать отношения типа «вход — выход» (в частности, RP, PR, OR, RO), а не отношения ОР и РО, как в СКМ.

Несмотря на изменение отношений в схеме КМПО, все процедуры анализа, применимые к СКМ, можно использовать и в РКМ, поскольку отношения ОР и РО выводимы из отношений RP, PR, OR, RO, что подтверждают следующие теоремы.

Теорема 1. Сечения отношения «объект — порождающие его выходные данные процессы» по каждому объекту из области определения этого отношения есть сечения отношения PR^{-1} по подмножеству множества R, представляющего собой сечение отношения OR по этому объекту:

$$op(o_i) = pr^{-1}(or(o_i)).$$

По определению для любого объекта $o_i \in O$ $or(o_i)$ есть множество ресурсов, являющихся выходными по отношению к рассматриваемому объекту. С другой стороны, зная код ресурса r_j , выходного по отношению к объекту o_i , можно определить процесс, для которого ресурс r_j будет выходным, с помощью функции, обратной функции pr . Пусть в результате получен процесс p_k : $p_k = pr^{-1}(r_j)$.

Если взять сечение отношения PR^{-1} по всему множеству $or(o_i)$, то результирующее множество будет требуемым сечением. Поэтому требуемое сечение можно найти по следующему соотношению:

$$op(o_i) = pr^{-1}(or(o_i)) \blacksquare. \quad (5)$$

Теорема 2. Сечения отношения «процесс — создающие его входные данные объекты» по каждому процессу из области определения этого отношения есть сечения отношения OR^{-1} по подмножеству множества R, представляющего собой сечение отношения RP по этому процессу:

$$po(p_i) = or^{-1}(rp(p_i)).$$

Для любого процесса $p_i \in P$ $rp(p_i)$ есть множество входных ресурсов. Зная код ресурса r_j , являющегося входным по отношению к p_i , можно определить объект, который производит данный ресурс, с помощью функции, обратной функции or . Пусть в результате получен объект o_k : $o_k = or^{-1}(r_j)$.

Если взять сечение отношения OR^{-1} по всему множеству $rp(p_i)$, то требуемое по условию теоремы множество определится по следующему соотношению:

$$po(p_i) = or^{-1}(rp(p_i)) \blacksquare. \quad (6)$$

Таким образом, полученные соотношения (1–6) связывают сечения дополнительных отношений РКМ с параметрами основных отношений, которые строятся при конструировании СКМ, что необходимо

для подготовки и выполнения имитации. Эти соотношения определяют структуру полей БДМ, которые необходимо автоматически генерировать в ходе имитации, и должны учитываться при разработке СЦД компонентов ППК, чтобы обеспечить синхронизацию структур СКМ и баз данных системы моделирования.

Заключение

В настоящей работе предложены и обоснованы основные средства формализации требований к компьютерным программам-исполнителям (ситуационным цифровым двойникам) элементов модели критических инфраструктур на примере промышленно-природных комплексов в рамках ранее разработанной ситуационной системы моделирования, ориентированные на ее децентрализованную реализацию в специализированном секторе Интернета для решения задач управления безопасностью и жизнеспособностью этих критически важных объектов. Такая спецификация может позволить избежать типичной для компьютерных задач начальной стадии хаотического развития программно-аппаратного обеспечения новых структурных проектов в этой области и ускорить процесс саморазвития, необходимый для эффективного объединения разработок цифровых двойников критически важных объектов и инфраструктур различных типов в рамках единой системы распределенных ситуационных центров. Полученные результаты нашли применение при разработке агрегированных цифровых моделей многоуровневой оценки и анализа надежности и устойчивости критически важных объектов [16, 17], а также виртуального когнитивного центра управления региональной безопасностью [18]. Это позволило количественно оценить общие риски и ситуационные факторы, влияющие на жизнеспособность критических инфраструктур различных категорий, полезные эффекты и возможные потери при реализации превентивных мер на всех стадиях управления инфраструктурными объектами.

Список источников

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNAzT11 guvX9Y00 yaFA4KkMWPYcWS8.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1> (дата обращения: 10.10.2024).
3. Федеральный закон от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Т. 51. — № 11. — С. 1016–1022.
5. Lampropoulos G., Larrucea X., Colomo-Palacios R. Digital Twins in Critical Infrastructure // Information. — 2024. — Vol. 15, Iss. 8. — Article no.: 454.
6. Tundis A., Ramírez-Agudelo O. H. Safeguarding Critical Infrastructures with Digital Twins and AI // Proceedings of the 23rd International Conference on Modeling and Applied Simulation (MAS 2024). — 2024. — Article no.: 010.
7. Tran M. Q., Sousa H. S., Texeira E., Matos J. C., Dang H. T. Digital Twin - solution in the digital age for improving critical infrastructure resilience to extreme events // Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems. 1st Edition. In Biondini and Frangopol (Eds). — CRC Press, 2023. — pp. 4147–4154
8. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / под. ред. А. И. Боровкова. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 492 с.
9. Fridman Alexander. Situational Modeling: Definitions, Awareness, Simulation. USA: Nova Science Publishers, Inc., 2023. — 331 p.

10. Некрасова Т. И. Задача Коши для многомерного разностного уравнения в конусах целочисленной решетки // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. 2012. № 5 (4). С. 576–580.
11. Digital Twin: Transforming How We Make Sense of Data // Электрон. дан. — 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptc.com/ru/industry-insights/digital-twin> (дата обращения: 10.10.2024).
12. Фридман А. Я. Опыт интеллектуализации методов ситуационного моделирования дискретных нестационарных пространственных объектов // Автоматика и телемеханика. 2022. № 6. С. 151–168.
13. Фридман А. Я. Экспертное пространство для ситуационного моделирования промышленно-природных систем // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. 2014. № 1 (4). С. 233–245.
14. Фридман А. Я. Интеграция концептов цифровых двойников и ситуационной осведомленности в системе моделирования критических инфраструктур // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1 (25). С. 70–78.
15. Фридман А. Я. Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2015.
16. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 1. Problem statement and method generic structure // Reliability and quality of complex systems. — 2024. — no. 1 (45). — pp. 124–141.
17. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities // Reliability and quality of complex systems. — 2024. — no. 3 (47).
18. Маслобоев А. В. Виртуальные когнитивные центры как интеллектуальные системы для информационной поддержки управления региональной безопасностью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 167–170.

References

1. Strategy for scientific and technological development of the Russian Federation (Decree of the President of the Russian Federation No. 145 of February 28, 2024). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNazTI1guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf>. (accessed 10.10.2024)
2. National Security Strategy of the Russian Federation (Decree of the President of the Russian Federation No. 400 of July 2, 2021). Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>. (accessed 10.10.2024)
3. Federal Law of July 26, 2017 No. 187-FL “On the security of critical information infrastructure of the Russian Federation”. Available at: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf>. (accessed 10.10.2024)
4. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Т. 51, № 11. С. 1016–1022.
5. Lampropoulos G., Larrucea X., Colomo-Palacios R. Digital Twins in Critical Infrastructure. *Information*. 2024. Vol. 15, Iss. 8. Article no.: 454.
6. Tundis A., Ramírez-Agudelo O. H. Safeguarding Critical Infrastructures with Digital Twins and AI. *Proceedings of the 23rd International Conference on Modeling and Applied Simulation (MAS 2024)*. 2024. Article no.: 010.
7. Tran M. Q., Sousa H. S., Teixeira E., Matos J. C., Dang H. T. Digital Twin - solution in the digital age for improving critical infrastructure resilience to extreme events. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems. 1st Edition. In Biondini and Frangopol (Eds)*. CRC Press, 2023. pp. 4147–4154
8. Digital Twins in the High-Technology Manufacturing Industry : monograph / ed. by A. I. Borovkov. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. 492 p.
9. Fridman A. Situational Modeling: Definitions, Awareness, Simulation. USA: Nova Science Publishers, Inc., 2023. 331 p.

10. Nekrasova T. I. The Cauchy Problem for a Multidimensional Difference Equation in Cones of an Integer Lattice. *Journal of the Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2012. no. 5 (4). P. 576–580.
11. Digital Twin: Transforming How We Make Sense of Data. *Electronic data*. 2022. Available at: <https://www.ptc.com/ru/industry-insights/digital-twin>. (accessed 10.10.2024)
12. Fridman A. Ya. Experience of intellectualization of methods of situational modeling of discrete non-stationary spatial objects. *Automation and Telemekhanics*. 2022. no. 6. P. 151–168.
13. Fridman A. Ya. Expert space for situational modeling of industrial and natural systems. *Bulletin of the Moscow University named after S. Yu. Witte*, no. 1(4), 2014, pp. 233–245.
14. Fridman A. Ya. Integration of Digital Twin and Situational Awareness Concepts in a Critical Infrastructure Modeling System. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2022. no. 1(25). P. 70–78.
15. Fridman A. Ya. Situational Management of the Structure of Industrial-Natural Systems. Methods and Models. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2015.
16. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 1. Problem statement and method generic structure. *Reliability and quality of complex systems*. 2024. no. 1(45). pp. 124–141.
17. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities. *Reliability and quality of complex systems*. 2024. no. 3(47).
18. Masloboev A. V. Virtual cognitive centers as intelligent systems for management information support of regional security. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014. no. 2(90). pp. 167–170.

Информация об авторах

А. Я. Фридман — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;

А. В. Маслобоев — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

A. Ya. Fridman — Doctor of Science (Tech.), Leading Research Fellow;

A. V. Masloboev — Doctor of Science (Tech.), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 10.10.2024; принята к публикации 21.10.2024.
The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 10.10.2024; accepted for publication 21.10.2024.