

ИНФОРМАТИКА

УДК 004
MSC 68Q01**Использование систем цифровых двойников при построении
социо-кибер-физических систем****А. И. Водяхо¹, Н. А. Жукова², В. Я. Ананьева¹*

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39

Для цитирования: *Водяхо А. И., Жукова Н. А., Ананьева В. Я.* Использование систем цифровых двойников при построении социо-кибер-физических систем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2024. Т. 20. Вып. 4. С. 467–478. <https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.403>

Современный этап развития техники и технологии позволяет создавать антропогенные системы, отличающиеся принципиально новым уровнем сложности по сравнению с существующими системами. Новые системы в большинстве своем являются многоуровневыми гетерогенными распределенными системами, в состав которых входят антропогенные физические сущности, виртуальные сущности, природные объекты, живые существа, люди и их коллективы. Подобные системы можно определить как социо-кибер-физические. Анализируется современное состояние техники построения социо-кибер-физических систем. Рассматривается один из возможных подходов к разработке таких систем, основанный на применении систем цифровых двойников времени выполнения. Предлагается эталонная архитектура цифрового двойника времени выполнения, созданная не на монокристаллической модели, а на системе моделей. Описываются типовые модели, которые могут использоваться при создании социо-кибер-физических систем. Изучается одна из ключевых проблем, встающих перед разработчиками социо-кибер-физических систем, — проблема построения модели человека.

Ключевые слова: социо-кибер-физические системы, цифровой двойник, система цифровых двойников, цифровой двойник человека.

1. Введение. Современный этап развития общества характеризуется высоким уровнем динамизма, что в значительной степени обуславливается высокими темпами развития техники и технологии, позволяющими строить антропогенные системы

* Работа выполнена за счет Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, проект № FFZF-2022-0006.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

принципиально нового уровня сложности, которые состоят из большого числа разнородных элементов. Подобные системы могут быть отнесены к классу социо-киберфизических (СКФС). Современные СКФС являются распределенными многоуровневыми информационно-ориентированными системами. При этом уровень сложности создаваемой СКФС определяется не только и не столько числом ее элементов, числом связей и числом уровней иерархии, сколько такими факторами как гетерогенность и динамичность структуры, а также варибельность поведения, в частности, способность к адаптации и обучению. Таким образом, можно выделить следующие ключевые отличия СКФС нового поколения от классических информационно-ориентированных систем: большая размерность, гетерогенность структуры, сложность поведения. Значительная часть систем этого типа принадлежит к классу систем систем (System of Systems — SoS), элементами которых могут быть не только антропогенные, но и природные системы, а также животные, люди и их коллективы. Такие системы характеризуются наличием большого числа пользователей (заинтересованных сторон), имеющих существенно разные интересы относительно СКФС.

В рамках предлагаемой работы использование цифровых двойников (ЦД) рассматривается как один из возможных подходов к построению СКФС, который становится ключевым при создании интеллектуальных СКФС, т. е. систем, применяющих механизмы работы со знанием. ЦД можно представить как цифровую модель СКФС или ее отдельных подсистем или элементов. Различные точки зрения на ЦД применительно к их использованию в распределенных СКФС рассмотрены в [1–6].

Можно определить следующие основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики современных СКФС: существует высокий уровень гетерогенности их структуры [7], значительная часть СКФС построена по принципу SoS [8], что приводит к тому, что информация о текущем состоянии отдельных подсистем может быть ограничена.

В настоящей статье предлагается один из возможных подходов к созданию СКФС, основанный на использовании систем ЦД времени выполнения, которые, в свою очередь, построены на основе полимодельного подхода.

2. Современное состояние техники построения СКФС и ЦД. ЦД широко применяются при разработке современных кибер-физических систем, однако основное внимание уделяется внедрению ЦД на этапах проектирования и производства. Специфика использования ЦД в распределенных системах, в частности построенных по принципу SoS [8], в известных публикациях также практически не рассматривается. Таким образом, анализ публикаций показывает, что большая их часть посвящена внедрению ЦД в процесс производства.

Быстрый прогресс развития техники и технологии открывает принципиально новые возможности для построения СКФС, где в качестве элементов кроме абстрактных и физических сущностей выступают также люди и их коллективы, которые должны быть представлены моделями.

Для построения СКФС необходимо обеспечить: 1) эффективную интеграцию разнородных элементов в единую СКФС; 2) разработку моделей в условиях неполного знания об элементах системы, поддержку моделей элементов системы в актуальном состоянии в условиях наличия ограниченной информации о системных событиях, необходимости объединения в единую систему разнородных элементов, представленных разнотипными моделями.

Одной из наиболее сложных задач, возникающих на пути построения СКФС, является создание полной модели человека как элемента СКФС. В настоящее вре-

мя это неразрешимая задача, однако отдельные аспекты человеческой деятельности можно успешно моделировать [7]. В качестве модели человека для использования в составе СКФС может выступать некоторая полимодель, включающая в себя набор частных связанных между собой моделей, которые должны строиться с учетом других элементов СКФС. Модели человека могут быть намного сложнее по сравнению с моделями физических элементов, входящих в состав СКФС; человек способен к обучению, причем различные люди в разной степени способны к обучению, что должно быть заложено в модель.

Предлагаемый подход можно считать конвергенцией нескольких известных подходов к построению СКФС. Речь идет о подходах, применяемых на разных этапах жизненного цикла, и о подходах, используемых для интеграции в единую систему элементов неодинаковой физической природы, т. е. речь идет о двух координатах. В первом случае описываются вопросы повторного использования моделей, построенных на более ранних этапах, для создания моделей на более поздних этапах жизненного цикла; во втором — интеграции моделей сущностей разной физической природы. Данные вопросы достаточно тесно связаны между собой.

Также рассматриваемый подход можно позиционировать как конвергенцию таких известных подходов как кибер-физические и социо-технические системы. Кроме того, с учетом постоянно изменяющихся структуры и поведения СКФС, к которым приводят различные факторы, в частности, изменение требований, появление новых возможностей и т. п., существенный интерес для развиваемого подхода представляют такие парадигмы как непрерывная архитектура [9] и DevOps [10], в рамках которых эти вопросы традиционно изучаются.

Предметом исследования в статье являются сложные СКФС, построенные по принципу SoS, которые являются антропогенными системами. Использование предлагаемого подхода позволит уменьшить совокупную стоимость владения СКФС за счет снижения стоимости создания и поддержания в актуальном состоянии системы моделей, возможности построения распределенных систем ЦД, возможности интеграции гетерогенных подсистем разной физической природы с помощью ЦД.

3. Общий подход к построению социо-кибер-физических систем с применением ЦД. В рамках развиваемого подхода ЦД рассматривается как элемент СКФС, включающий в себя три составляющие; его можно определить как $SYS = \langle OBS, DT, STHC \rangle$, где SYS — некоторая социо-кибер-физическая система, OBS — наблюдаемая система произвольной природы, DT — множество ее ЦД, а $STHC$ (Stakeholders Concerns) — интересы заинтересованных сторон, в качестве которых могут выступать как люди (операторы, владельцы, продавцы, покупатели и др.), так и другие подсистемы произвольной природы. Каждая заинтересованная сторона имеет определенные интересы. Для одной и той же наблюдаемой системы может быть построено произвольное число ЦД, которые соответствуют архитектурным точкам зрения и строятся исходя из интересов заинтересованных сторон (рис. 1).

Можно представить, что СКФС состоит из двух связанных между собой миров: мира взаимодействующих между собой разнотипных сущностей (физических, природных, виртуальных, живых существ, в частности людей), мира виртуальных сущностей и множества заинтересованных сторон.

Достаточно трудно представить себе ЦД сложной распределенной СКФС в виде монолитной сосредоточенной системы. По этой причине ЦД такой системы в подавляющем большинстве случаев представляет собой распределенную систему, причем ее структура не обязательно совпадает со структурой наблюдаемой СКФС.

Заинтересованные стороны

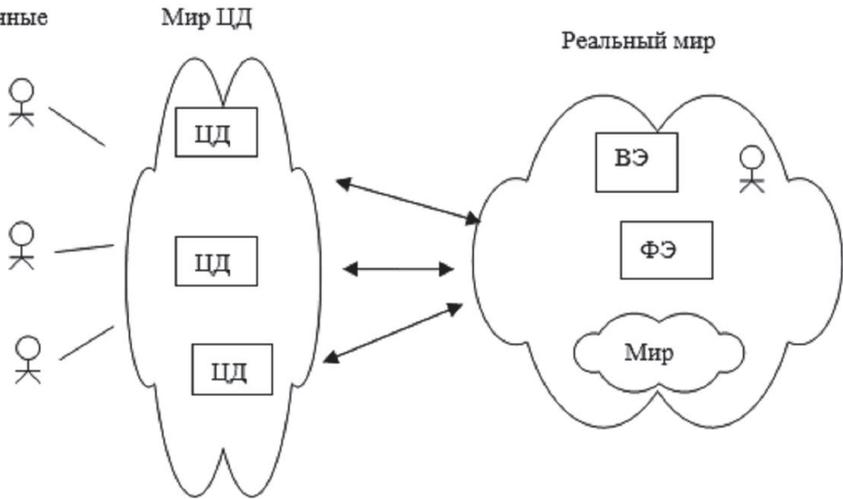


Рис. 1. ЦД как элемент СКФС (идеализированная модель)
ВЭ — виртуальный элемент; ФЭ — физический элемент.

В наиболее общем виде типовая структура СКФС, которая может быть построена как SoS, показана на рис. 2. В зависимости от способов взаимодействия между отдельными системами это может быть управляемая, федеративная или коалиционная система [8] (конфликтующие системы в данной статье не рассматриваются). СКФС могут включать в себя как антропогенные подсистемы, так и природные объекты, а также людей, т. е. они являются гетерогенными системами. ЦД выступают в качестве средства интеграции подобных гетерогенных систем.

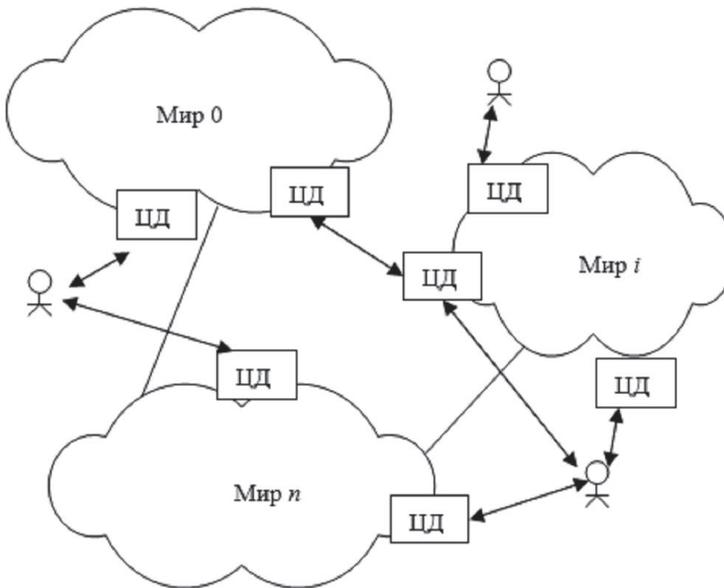


Рис. 2. Распределенная СКФС

Практически все более или менее крупные СКФС являются распределенными системами. ЦД — это полноправные элементы СКФС, т. е. в общем случае элементы распределенной СКФС, хотя и реализуют вспомогательные функции. Таким образом, ЦД — чисто цифровой вспомогательный элемент СКФС. Он может быть двойником элемента СКФС любой природы, в частности, виртуального элемента.

В качестве самого общего определения ЦД можно предложить следующее: это набор моделей, относящихся к разным этапам жизненного цикла наблюдаемой сущности, построенный в интересах различных заинтересованных сторон. Данное определение достаточно хорошо работает, когда речь идет об антропогенных системах, но начинает давать сбои при попытках использовать его применительно к природным. Здесь возникают по крайней мере три проблемы: обычно знание о наблюдаемой системе оказывается неполным; наблюдаемая система может быть стохастической; наблюдаемая система и ее элементы могут эволюционировать, т. е. изменять свои структуру и поведение.

ЦД практически любой достаточно сложной СКФС, как правило, оказывается невозможно описать с помощью одной модели. Требуется использовать комплекс моделей, в который могут входить модели, относящиеся к различным этапам жизненного цикла, и модели, отражающие различные точки зрения. Множество этих моделей можно определить термином «полимодель» [9].

Полимодель можно считать многоуровневой моделью, к элементам которой относятся другие модели. Применительно к предмету рассмотрения, в качестве которого выступают СКФС, можно выделить два основных типа полимоделей: полимодели первого и второго типов. Полимодель можно определить как виртуальную систему, элементами которой являются модели, при этом входящие в нее в качестве элементов модели могут быть разнотипными и многоуровневыми.

Применительно к сложным СКФС полимодели могут быть представлены следующим образом: множество моделей, относящихся к разным фазам жизненного цикла; множество моделей, относящихся к различным подсистемам для каждого этапа жизненного цикла; множество моделей, отражающих интересы многих заинтересованных сторон; множество моделей, описывающих различные состояния СКФС. Очевидно, что число моделей оказывается очень велико.

Модели, соответствующие сущностям разнообразной физической природы, могут очень существенно отличаться. При этом каждой наблюдаемой сущности в общем случае соответствует несколько моделей, которые строятся согласно интересам заинтересованных сторон. Однотипные модели, относящиеся к различным этапам жизненного цикла, могут также существенно отличаться. Чаще всего используются структурные модели, модели поведения, модели трансформаций, модели обучения.

С учетом гетерогенности СКФС в качестве эталонной модели (reference model) таких систем предлагается использовать систему взаимосвязанных моделей, которые могут иметь динамическую структуру и реализовывать различное поведение.

4. ЦД времени выполнения. Такой двойник можно определить как ЦД, используемый на этапе функционирования системы и предназначенный для решения задач, возникающих в процессе эксплуатации СКФС. Применительно к сложным СКФС провести четкую границу между фазами эксплуатации и модернизации не всегда возможно, поскольку они подвергаются непрерывной модернизации. В этом случае на передний план выступает подход, основанный на идеях непрерывной архитектуры.

С точки зрения жизненного цикла СКФС ЦД времени выполнения занимает про-

межучточное положение между ЦД времени проектирования и ЦД времени модернизации. Кроме того, на данном этапе ЦД должен обеспечивать эффективное функционирование наблюдаемой системы и поддерживать механизмы адаптации. Для СКФС, особенно когда наблюдаемая система является федеративной или коалиционной, провести четкую границу между этими фазами часто оказывается затруднительно, поскольку структура и поведение сложных СКФС и входящих в их состав подсистем постоянно изменяются. При этом следует заметить, что механизмы архитектурной гибкости и механизмы адаптации, применяемые на этапе модернизации, могут быть существенно различны. Обычно подобные механизмы рассматриваются как независимые. Механизмы, используемые в процессе функционирования, обычно определяются таким термином как «динамическая архитектура» [11]; механизмы, применяемые на этапе модернизации, можно определить, например, термином «гибкая архитектура» [12]. Известны и другие термины, характеризующие эти механизмы.

ЦД времени выполнения рассматривается как полноправный элемент СКФС и может позволить выполнять следующие функции в рамках такой системы: наблюдать за состоянием и (или) управлять состоянием системы (элемента системы); выполнять функции интерфейсного элемента, обеспечивающего доступ к отдельным элементам (подсистемам); формировать требуемое представление в интересах одной или нескольких заинтересованных сторон; проводить эксперименты.

В самом общем виде СКФС, построенная по принципу коалиционной или более простой системы [8], элементами которой могут быть вложенные системы, интересы которых не всегда совпадают, может быть определена как $SCPS = \langle SHLD, EL_i, L_i, L_{i+1}, B_i, \Delta T \rangle$, где SHLD — множество заинтересованных сторон, которые имеют свои интересы, выражаемые в форме целей; EL_i — множество элементов i -го уровня; L_i — множество связей между элементами i -го уровня; L_{i+1} — множество связей с элементами $i+1$ -го уровня; B_i — множество стереотипов поведения; ΔT — временной интервал, в рамках которого архитектура актуальна.

В свою очередь, множество элементов i -го уровня можно определить таким образом: $\langle EL_i \rangle ::= \langle \text{антропогенная физическая сущность} \rangle | \langle \text{виртуальная сущность} \rangle | \langle \text{природная сущность} \rangle | \langle \text{человек} \rangle | \langle \text{группа людей} \rangle | \langle \dots \rangle$.

Упрощенная структура СКФС, являющейся распределенной многоуровневой динамической системой, показана на рис. 3.

СКФС может включать в себя следующие элементы: множество физических элементов; множество виртуальных элементов; множество людей и коллективов людей, представленных агентами; множество ЦД; множество вложенных СКФС более низкого уровня, которые выступают в качестве элементов. Число уровней вложенности в рассматриваемых системах не ограничено, но конечно. В общем случае СКФС может строиться по принципу SoS и принадлежать к классам федеративных или коалиционных систем [8].

Обобщенная структура элемента СКФС на базе ЦД показана на рис. 4. Элемент включает в себя моделируемую сущность и его ЦД (модель), которая может быть объектом любой природы, обладать собственными связями с другими элементами СКФС, также являющимися элементами любой природы. ЦД включает в себя репозиторий моделей, процессор запросов и процессор моделей. Репозиторий моделей хранит модели СКФС или отдельных подсистем такой системы, которые отражают отдельные точки зрения. Сами модели будут рассмотрены далее.

Процессор запросов отвечает за обработку запросов к подсистеме СКФС со стороны других сущностей, находящихся как внутри СКФС, так и вне ее. Процессор за-

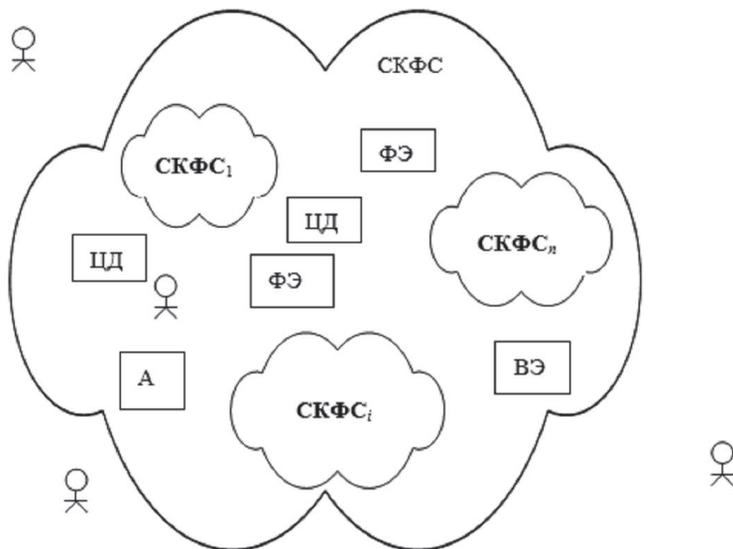


Рис. 3. Упрощенная структура СКФС времени выполнения
А — агент.

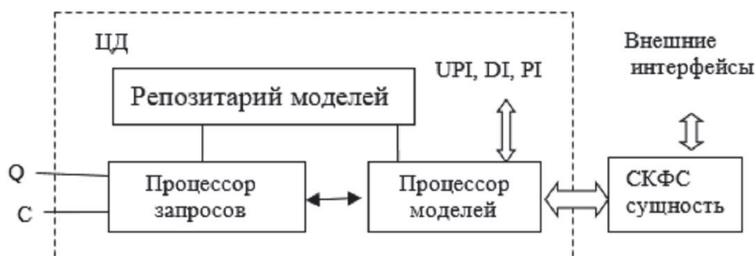


Рис. 4. Обобщенная структура элемента на базе ЦД
Объяснение в тексте.

просов взаимодействует с другими подсистемами через два интерфейса. Интерфейс Q (Query interface) отвечает за прием и выдачу запросов к другим элементам СКФС, а интерфейс C (Control interface) используется для управления состоянием данной системы. Процессор моделей отвечает за поддержание моделей, хранящихся в репозитории, в актуальном состоянии. Он может взаимодействовать через интерфейс UPI (UP Interface) с элементами более высокого уровня, через интерфейс DI (Down Interface) с элементами более низкого уровня и через интерфейс PI (Peer Interface) с элементами одного уровня. Процессор запросов и процессор моделей работают параллельно и асинхронно.

Для организации СКФС на основе ЦД с учетом рассмотренной структуры их элементов естественным является использование сервисно-ориентированного подхода в широком смысле, когда речь идет не только о применении цифровых сервисов.

Использование ЦД требует решения, по крайней мере, таких ключевых задач: 1) интеграция отдельных моделей, т. е. построение системы моделей; 2) поддержание моделей, входящих в состав ЦД, в актуальном состоянии. Интеграция разнотипных моделей в систему моделей является задачей, известной как высокоуровне-

вая архитектура [13]. Поддержание распределенной гетерогенной системы моделей представляется более сложной задачей, особенно когда речь идет о нижнем уровне (обычно это уровень Интернета вещей), где пропускная способность каналов связи и процессорные мощности ограничены. Еще одна проблема касается того, что разные заинтересованные стороны используют различные модели. Это приводит к тому, что требуется поддерживать большое число связанных между собой моделей при достаточно жестких ограничениях на пропускную способность каналов связи и мощность процессоров. Еще одна проблема заключается в том, что часто элементы и связи между элементами системы изменяются, например, когда объекты подвижны.

Предлагаемая идея построения системы ЦД состоит в ее представлении в виде автоматной сети, которую будем называть N-моделью или N-автоматом. В основу ее построения положены идеи машин с динамической архитектурой [11], суть которых в следующем. N-автомат представляет собой динамическую систему, включающую элементарные автоматы (A-автоматы). Каждый A-автомат в исходном состоянии не имеет связей с другими A-автоматами и по существу есть класс автоматов. Множество связанных автоматов образуют сеть. В каждый конкретный момент времени множество A-автоматов организуются в виде множества деревьев и множества свободных автоматов. A-автомат может занимать три позиции в системе автоматов: корневой, промежуточный и терминальный. Каждый A-автомат в связанном состоянии характеризуется вектором состояния, структура которого зависит от типа запроса. Каждый элемент вектора состояния находится в одном из трех состояний: актуально, неизвестно или неактуально. Функционирование N-автомата может быть описано в терминах динамической автоматной сети [11] следующим образом. В исходном состоянии имеем множество не связанных между собой A-автоматов, которые используются для построения дерева (графа) запросов. После этого имеем автоматы трех типов: корневые, промежуточные автоматы A_i и терминальные автоматы A_t , которые образуют автоматную экосистему (A-экосистему). Запросы на построение моделей могут поступать на корневой автомат A_r . После получения запроса автомат A_r переходит в связанное состояние. Если требуемая модель может быть создана, а для этого требуется построить вложенные модели, то с помощью систем правил формируются запросы к промежуточным автоматам A_i , которые также переходят в занятое состояние. Каждый из автоматов A_i может инициализировать произвольное число других A_i и A_t автоматов.

Принципиально, что на базе N-сети одновременно может строиться несколько моделей. Для этого требуется в дескрипторе A-автомата указать идентификатор запроса. Тогда считается, что в A-экосистеме каждый A-автомат представлен произвольным числом экземпляров.

Построенные модели ЦД можно сохранять для повторного использования. Однако реально это можно сделать только в облаке. Если принять во внимание, что под различные запросы строятся разные модели, то размер сохраняемых моделей может быть достаточно большим. Кроме того, при изменении структуры СКФС модель приходится перестраивать.

Большинство моделей сложных СКФС представляет собой системы частных моделей, описывающих разные точки зрения. Типы применяемых моделей определяются как интересами заинтересованных сторон, так и спецификой СКФС и ее элементов. Например, в качестве моделей аналоговых систем обычно применяются дифференциальные уравнения. Структурно-функциональные модели — это наиболее часто используемые модели.

Структурно-функциональные модели можно определить как модели, описывающие системы, в данном случае СКФС, в терминах их структур и поведения. В зависимости от назначения могут быть созданы разные структурно-функциональные модели времени выполнения. Рассмотрим достаточно узкий, но широко распространенный подкласс структурно-функциональных моделей — дискретные модели дискретных систем.

Структурно-функциональная модель как модель, входящая в состав ЦД времени выполнения, описывает структуру и поведение элемента СКФС, которая в общем случае является многоуровневой распределенной системой. Такая структурно-функциональная модель относится к цифровым. Для характеристики структуры первоочередной интерес представляют графовые модели, для описания поведения могут быть использованы разные модели, в том числе модели параллельных асинхронных процессов (сети Петри, BPMN, YAWL (Yet Another Workflow Language) [14]).

Обобщенной структурно-функциональной моделью (метамоделью) может служить модель акторов [15], которая рассматривает акторов как агентов, которые сопоставляют каждое входящее сообщение с тремя кортежами, состоящими из конечного набора сообщений, отправляемых другим акторам. Новое поведение формируется в зависимости от предыстории в терминах нового набора акторов.

Выход СКФС на новый уровень сложности связан, в частности, с включением в их состав новых типов сущностей, таких как человек (группа и коллективы людей). Человек при этом рассматривается как полноправный элемент СКФС. При этом сам человек, с точки зрения теории систем, является большой и сложной системой.

В [7] для решения проблемы построения ЦД человека предлагается использовать концепцию глобального ЦД, в соответствии с которой ЦД человека определяется как сумма всей хранящейся в цифровом виде информации и прогнозных знаний, касающихся конкретного человека, т. е. предлагается применять систему доменно-ориентированных моделей. В различных науках термин ЦД человека в зависимости от контекста трактуется по-разному [7]. В самом общем виде его можно определить как ЦД, где в качестве наблюдаемой сущности выступает человек.

ЦД человека могут быть построены в терминах разных групп атрибутов, таких как физические, физиологические, эмоциональные, ментальные характеристики. При этом следует отметить, что данный список далеко не полный. ЦД человека используются в таких областях как производство, медицина, образование, спорт [7].

5. Заключение. В данной статье рассматриваются вопросы использования ЦД при построении СКФС, создание которых в настоящее время является одним из магистральных направлений развития техники и технологий.

Современный этап развития информационных технологий характеризуется, с одной стороны, постоянным увеличением уровня сложности создаваемых информационно-ориентированных систем, а с другой — постоянным повышением уровня их интеллекта, т. е. их интеллектуализацией.

Интеграция систем разной физической природы — одна из ключевых проблем на пути дальнейшего развития СКФС. ЦД могут рассматриваться как один из действенных инструментов интеграции разнородных СКФС, используемых, в частности, при построении федеративных и коалиционных систем.

Еще одной особенностью современного этапа развития информационно-ориентированных систем являются попытки включить человека в состав кибер-физических систем, т. е. перейти от кибер-физических систем к социо-кибер-физическим системам. Основная проблема построения таких систем связана с созданием модели че-

ловека. Она состоит в том, что, с одной стороны, отсутствует полная информация о человеке как объекте моделирования, а с другой — человек может обучаться, и его поведение как элемента СКФС может зависеть от очень многих факторов.

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода планируется осуществлять по следующим направлениям: 1) переход к практической реализации ЦД человека (разработка моделей, онтологий и фреймворков); 2) расширение области применения ЦД человека, создание ЦД, способных работать с ментальными категориями; 3) анализ возможных подходов к обучению моделей, в частности распределенных; 4) исследование возможности использования описанного подхода при построении гибридных интеллектуальных систем.

Можно выделить основные задачи, требующие решения на пути дальнейшего развития предлагаемого подхода: 1) автоматическое построение и поддержание моделей, входящих в состав ЦД, в первую очередь модели человека, в актуальном состоянии в режиме реального времени с требуемым уровнем качества; 2) обучение моделей, входящих в состав распределенных динамических ЦД, в том числе ЦД человека.

Литература

1. *Van der Valk H., Möller F., Arbter M., Henning J. L., Otto B.* A taxonomy of digital twins // Americas Conference on Information Systems. 2020. P. 1–10.
2. *Ricci A., Croatti A., Mariani S., Montagna S., Picone M.* Web of digital twins // ACM Transactions on Internet Technology. 2022. Vol. 22. N 4. P. 1–30. <https://doi.org/10.1145/3507909>
3. *Zhihan Lv., Fersman E.* Digital twins: Basics and applications. Cham: Springer International Publ., 2022. 99 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11401-4>
4. *Auer M. E., Ram B. K.* Cyber-physical systems and digital twins. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 862 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23162-0>
5. *Vohra M.* Digital twin technology: Fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons, 2023. 272 p.
6. *Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B. D., Hu Z.* A comprehensive review of digital twin. Pt 1: Modeling and twinning enabling technologies // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2022. Vol. 65. N 12. P. 1–75.
7. *Gräßler I., Maier G. W., Steffen E., Roesmann D.* The digital twin of humans. Cham: Springer International Publ., 2023. Vol. 10. 978 p.
8. *Jamshidi M.* System of systems engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 593 p.
9. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. *Bass L., Weber I., Zhu L.* DevOps: A software architect's perspective. Reading: Addison-Wesley Professional, 2015. 352 p.
11. *Торгашев В. А.* Динамические автоматные сети // Информатика и автоматизация. 2013. Т. 4. № 27. С. 23–34.
12. *Bloomberg J.* The agile architecture revolution: how cloud computing, rest-based SOA, and mobile computing are changing enterprise IT. New York: John Wiley & Sons, 2013. 304 p.
13. *HLA Working Group.* IEEE 1516-2010 — IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules. New York, USA: IEEE Computer Society, 2010. 38 p.
14. *Mendling J., Reijers H. A., La Rosa M., Dumas M.* Fundamentals of business process management. Berlin: GI-Jahrestagung, 2013. 157 p.
15. *Hewitt C.* Actor model of computation: Scalable robust information systems. 2010. URL: <https://arxiv.org/pdf/1008.1459> (дата обращения: 1 августа 2024 г.).

Статья поступила в редакцию 14 августа 2024 г.

Статья принята к печати 4 октября 2024 г.

Контактная информация:

Водяго Александр Иванович — д-р техн. наук, проф.; <https://orcid.org/0000-0002-0933-0933>, aivodyaho@mail.ru

Жукова Наталья Александровна — д-р техн. наук, вед. науч. сотр.;
<https://orcid.org/0000-0001-5877-4461>, nazhukova@mail.ru

Ананьева Варвара Яновна — аспирант, ассистент; <https://orcid.org/0009-0000-2074-5438>,
varvara.spb99@mail.ru

The use of digital twin systems in the construction of socio-cyber-physical systems*

A. I. Vodyaho¹, N. A. Zhukova², V. Y. Ananeva¹

¹ St. Petersburg Electrotechnical University, “LETI” named after V. I. Uljanov (Lenin),
5, ul. professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research center of the Russian Academy of Sciences,
39, 14-ya liniya V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Vodyaho A. I., Zhukova N. A., Ananeva V. Y. The use of digital twin systems in the construction of socio-cyber-physical systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2024, vol. 20, iss. 4, pp. 467–478.
<https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.403> (In Russian)

The modern stage of technology development allows us to create anthropogenic systems that feature a fundamentally new level of complexity compared to existing systems, which for the most part are multilevel heterogeneous distributed systems, which include anthropogenic physical entities, virtual entities, natural objects, living beings, people and human collectives. Such systems can be defined as socio-cyber-physical systems. The article analyzes the current state of technology for building socio-cyber-physical systems, and considers the possibility of using digital twins in their construction. The possible aspects of using digital twin in the construction of this class of systems are considered. This article discusses one of the possible approaches to the construction of socio-cyber-physical systems based on the use of runtime digital twin systems built using a polymodel approach. The proposed approach can be considered as a convergence of several well-known approaches to the construction of socio-cyber-physical systems. A reference architecture of the run-time digital twin is proposed, the basis of which is not a monolithic model, but a system of models. Typical models that can be used in the construction of socio-cyber-physical systems are analyzed. One of the key problems facing the developers of socio-cyber-physical systems is the construction of a human model.

Keywords: socio-cyber-physical systems, digital twins, digital twin system, human digital twin.

References

1. Van der Valk H., Möller F., Arbter M., Henning J. L., Otto B. A taxonomy of digital twins. *Americas Conference on Information Systems*, 2020, pp. 1–10.
2. Ricci A., Croatti A., Mariani S., Montagna S., Picone M. Web of digital twins. *ACM Transactions on Internet Technology*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 1–30. <https://doi.org/10.1145/3507909>
3. Zhihan Lv., Fersman E. *Digital twins: Basics and applications*. Cham, Springer International Publ., 2022, 99 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11401-4>
4. Auer M. E., Ram B. K. *Cyber-physical systems and digital twins*. Cham, Springer Nature Switzerland AG Publ., 2020, 862 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23162-0>
5. Vohra M. *Digital twin technology: Fundamentals and applications*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2023, 272 p.

* This work was supported by the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, project no. FFZF-2022-0006.

6. Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B. D., Hu Z. A comprehensive review of digital twin. Pt 1: Modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, vol. 65, no. 12, p. 1–75.
7. Gräßler I., Maier G. W., Steffen E., Roesmann D. *The digital twin of humans*. Cham, Springer International Publ., 2023, vol. 10, 978 p.
8. Jamshidi M. *System of systems engineering*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2009, 593 p.
9. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikooy slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov* [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 410 p. (In Russian)
10. Bass L., Weber I., Zhu L. *DevOps: A software architect's perspective*. Reading, Addison-Wesley Professional Publ., 2015, 352 p.
11. Torgashev V. A. Dinamicheskie avtomatnye seti [Dynamic automata networks]. *SPIIRAS Proceedings*, 2013, vol. 4, no. 27, pp. 23–34. (In Russian)
12. Bloomberg J. *The agile architecture revolution: How cloud computing, rest-based SOA, and mobile computing are changing enterprise IT*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2013, 304 p.
13. HLA Working Group. *IEEE 1516-2010 — IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA). Framework and Rules*. New York, USA, IEEE Computer Society Publ., 2010, 38 p.
14. Mendling J., Reijers H. A., La Rosa M., Dumas M. *Fundamentals of business process management*. Berlin, GI-Jahrestagung Publ., 2013, 157 p.
15. Hewitt C. *Actor model of computation: Scalable robust information systems*. 2010. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1008.1459> (accessed: August 1, 2024).

Received: August 14, 2024.

Accepted: October 4, 2024.

A u t h o r s ' i n f o r m a t i o n :

Alexander I. Vodyaho — Dr. Sci. in Engineering, Professor; <https://orcid.org/0000-0002-0933-0933>, aivodyaho@mail.ru

Natalya A. Zhukova — Dr. Sci. in Engineering, Leading Researcher; <https://orcid.org/0000-0001-5877-4461>, nazhukova@mail.ru

Varvara Y. Ananeva — Postgraduate Student, Assistant; <https://orcid.org/0009-0000-2074-5438>, varvara.spb99@mail.ru