УДК 004.94

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-6-24-34

Использование цифровых двойников в системах управления образовательным контентом

В. Я. Ананьева, А. И. Водяхо✉, Б. Я. Советов, В. В. Цехановский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ aivodyaho@mail.ru

Аннотация. В предлагаемой статье рассматривается основанный на использовании цифровых двойников подход к построению социо-киберфизических систем, элементами которых являются антропогенные и природные подсистемы, люди и коллективы людей. Освещаются проблемы, связанные с созданием цифрового двойника человека в качестве элемента социо-киберфизической системы. Предлагается эталонная модель такой системы. В статье рассматривается возможность использования цифрового двойника студента при построении образовательных траекторий студентов, обучающихся по магистерским и инженерным программам в сфере информационных технологий. Для описания образовательного процесса предлагается использовать аппарат относительно-конечных автоматов, каждому состоянию которых ставится в соответствие граф знаний. Также изучается возможность применения генеративных нейронных сетей при построении цифровых двойников человека.

Ключевые слова: графы знаний, генеративные нейронные сети, социо-киберфизические системы, цифровые двойники человека, компетентностные модели

Для цитирования: Использование цифровых двойников в системах управления образовательным контентом / В. Я. Ананьева, А. И. Водяхо, Б. Я. Советов, В. В. Цехановский // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 24–34. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-24-34.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

The Use of Digital Twins in Educational Content Management Systems

V. Ya. Ananeva, A. I. Vodyaho✉, B. Ya. Sovetov, V. V. Tsekhanovsky

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ aivodyaho@mail.ru

Abstract. The proposed article considers based on the use of digital twins approach to the construction of socio-cyberphysical systems, the elements of which are anthropogenic subsystems, natural subsystems, people and human collectives. The problems associated with the creation of human digital twin as an element of a socio-cyberphysical system are considered. A reference model of such a system is proposed. The article considers the possibility of using student's digital twin in the construction of educational trajectories of students studying for master's and engineering programs in the field of information technology. To describe the educational process, it is proposed to use the apparatus of relatively finite automata, each state of which corresponds to a graph of knowledge. The possibility of using generative neural networks in the construction of human digital twins is also being considered.

© В. Я. Ананьева, А. И. Водяхо, Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, 2025

Keywords: knowledge graphs, generative neural networks, socio-cyberphysical systems, human digital twins, competence models

For citation: The Use of Digital Twins in Educational Content Management Systems / V. Ya. Ananeva, A. I. Vodyaho, B. Ya. Sovetov, V. V. Tsekhanovsky // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 24–34. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-24-34.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Активное применение информационных технологий способствует их постоянному развитию. Появляются новые парадигмы – киберфизические (КФС) [1], социо-киберфизические (СКФС) системы [2] и т. п. Значительная часть современных КФС и СКФС может быть отнесена к классам больших и сложных систем [3], которые строятся по принципу системы систем [4]. Серьезным вызовом для разработчиков представляется создание сложных СКФС, где человек выступает в качестве элемента. К настоящему времени известно большое число исследований, посвященных построению моделей человека [2].

Одним из возможных подходов к построению СКФС служит подход, основанный на применении цифровых двойников (ЦД), в частности цифровых двойников человека (ЦДЧ) [5]. ЦД традиционно наиболее активно используются применительно к производственным системам [6]. Однако в последние годы все чаще стали говорить о других типах ЦД, в частности о ЦД времени выполнения [7], ЦД природных систем [8], а также о ЦДЧ [5] и ЦД коллектива людей [9]. Однако на этом пути возникли серьезные проблемы, связанные, в первую очередь, с созданием ЦДЧ. Очевидно, что создание более или менее полной модели человека вряд ли возможно в обозримом будущем, однако создание ЦДЧ, инкапсулирующих частные модели, вполне возможно.

В настоящей статье освещаются возможные подходы к использованию ЦДЧ применительно к системам образования.

Рассматриваются вопросы использования ЦДЧ в системах управления образовательным процессом с точки зрения получения востребованных компетенций применительно к образованию в ИТ-сфере, которая характеризуется высоким уровнем динамики.

Оценка современного состояния и перспективы использования ЦДЧ при построении СКФС. Технологии, основанные на ЦД, известны относительно давно и на момент написания данной статьи активно используются.

Можно считать, что у истоков технологий ЦД стоят три подхода:

– проект, в основу которого положена идея системы ЦД [10];

– использование ЦД времени выполнения, который можно связать с проектом ЦД космического корабля, хотя этот проект предусматривает использование не ЦД, а физического двойника [11];

– использование ЦД на этапе производства (ЦД продукта) [12].

Широкое практическое применение технологии ЦД нашли начиная с 2010-х гг. При этом наибольшее практическое применение ЦД нашли в сфере производства. В частности, ЦД – это один из ключевых компонентов таких парадигм, как Industry 4.0 и Industry 5.0 [13]. В последние годы термин «цифровой двойник продукта» часто использовался как синоним термина «цифровой двойник».

ЦД времени выполнения до этих дней уделялось значительно меньше внимания. Еще меньше внимания уделяется вопросам построения систем ЦД, ориентированных на использование в рамках цифровых нитей [14] и вопросам практического применения ЦДЧ и ЦД групп людей. Настоящая статья представляет собой попытку закрыть эти вопросы. Причем речь идет не о построении комплексной модели человека, а о применении частных моделей при построении ЦДЧ для использования в качестве элемента СКФС.

В последние годы все большее внимание уделяется вопросам построения КФС, элементами которых служат не только антропогенные, но и природные сущности, живые существа, люди, коллективы людей. Подобные системы могут быть отнесены к классу СКФС. Принципиальное отличие СКФС от КФС состоит в том, что их структура и поведение могут быть до конца неизвестны. Это приводит к необходимости рассматривать СКФС как системы, построенные по принципу системы систем [4].

Одна из ключевых проблем построения СКФС состоит в том, каким образом создать ЦД человека (группы людей) как элемент СКФС [5]. В последние годы предпринимаются активные попытки ее решения, однако успехи в этом плане достаточно скромные. Основные проблемы, с

которыми сталкиваются разработчики СКФС, состоят в следующем:

1) человек как элемент СКФС сам по себе представляет собой большую и сложную систему. Мерой внутренней сложности может быть число внутренних состояний, а мерой внешней сложности – число связей с внешней средой [15], [16]. Понятие большой системы обычно определяется следующим образом: «ее исследование или моделирование затруднено из-за большой размерности и для ее исследования не хватает таких ресурсов как время, производительность компьютеров, объем баз данных и т. п.» [16]. Т. е. этот термин отражает точку зрения исследователя на систему, в частности СКФС;

2) человека в качестве элемента СКФС в общем случае нельзя рассматривать как пассивный элемент;

3) поведение человека в значительной степени определяется как внешними факторами, так и особенностями конкретного человека.

Предлагаемый подход к использованию ЦД в рамках СКФС. В настоящей статье рассматривается один из возможных подходов к построению СКФС, основанный на использовании систем ЦД и, в частности, ЦДЧ. Следует заметить, что это не единственно возможный подход. В основу развиваемого подхода положены следующие положения:

1) СКФС рассматривается как коалиционная система, построенная по принципу системы систем, в которой отдельные подсистемы (субсистемы) могут быть управляемыми, федеративными или коалиционными. Люди и группы людей представляются как коалиционные системы [4];

2) ЦД и ЦД группы систем представляются в виде отдельной системы.

Упрощенная структура СКФС, базирующаяся на использовании ЦД, показана на рис. 1. СКФС, исходя из этого рисунка, может включать в себя произвольное число вложенных систем, которые могут быть управляемыми, федеративными или коалиционными (конфликтующие системы [4] в данной статье не рассматриваются). Каждая из вложенных систем может включать в себя произвольное число физических (ФС), виртуальных (программных) (ВС), природных (ПрС), естественных (ЕС) систем, систем людей, коллективов людей. Кроме того, в качестве элементов могут выступать вложенные системы более низкого уровня. ЦД также входят в состав системы всех уровней. Элементы отдельных вложенных систем могут объединяться посредством связей разной природы (физическими, энергетическими, логическими, информационными и др.). ЦД выполняют функции трансформаторов представлений, использование которых позволяет сформировать требуемое представление некоторой сущности в требуемой форме в цифровом виде. Человек как элемент СКФС может быть представлен своим ЦД, хотя это не обязательно.

ЦДЧ как элемент СКФС. ***Классификация ЦДЧ.*** Построение ЦД человека – задача сверхсложная, поскольку сам человек – это сверхсложная система, и построить более-менее полную цифровую модель человека вряд ли возможно. Однако построение частных моделей вполне реально.

Классификация ЦДЧ, ориентированных на использование в СКФС, приведена на рис. 2.

В качестве наблюдаемых объектов могут выступать как отдельные люди, так и группы людей. ЦДЧ могут строиться с разными целями: выявить некоторые факты, например мотивы поведения;

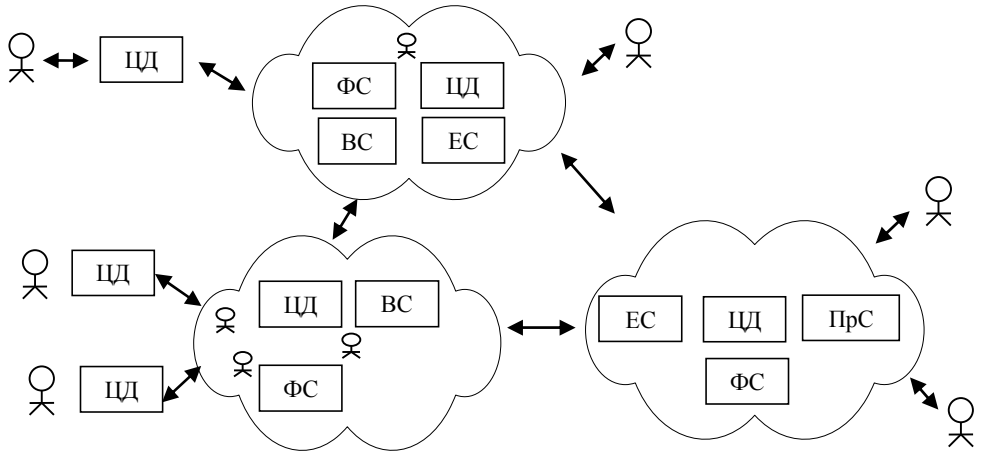

Рис. 1. Обобщенная структура СКФС
Fig. 1. SCPS generalized structure

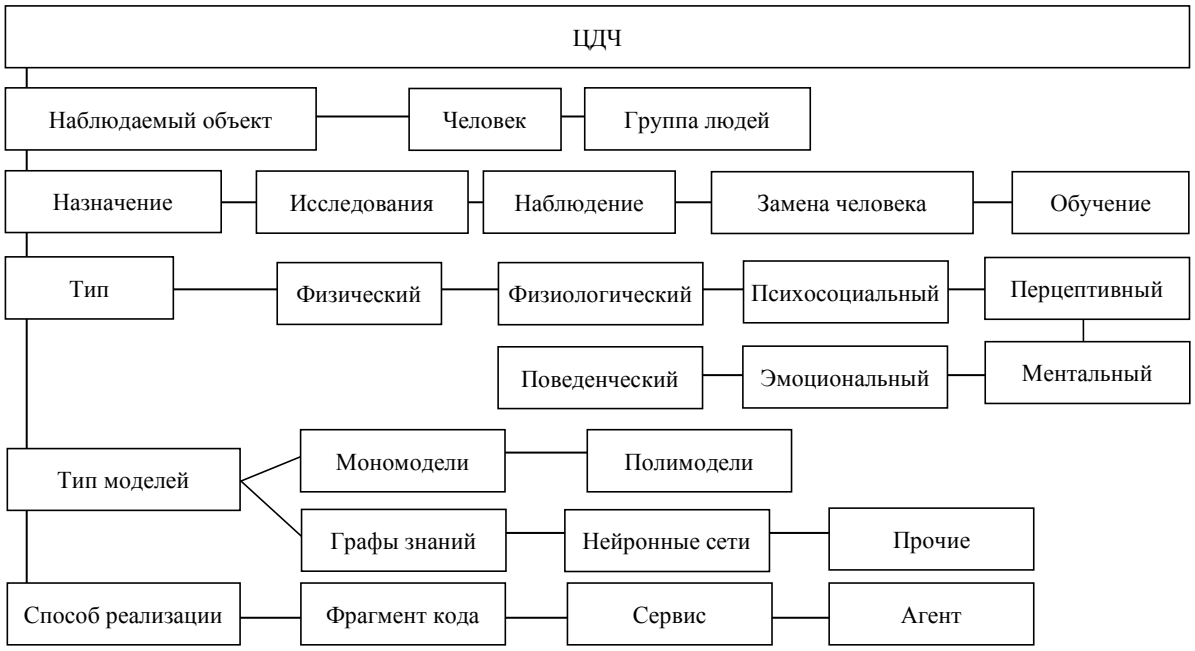

Рис. 2. Классификация ЦДЧ
Fig. 2. HDT classification

представить результаты наблюдения за человеком (группой людей) для построения модели поведения человека, например поведения водителя автомобиля; с целью замены человека; мониторить процесса обучения.

ЦДЧ может быть построен с использованием различных атрибутов человека, может включать в себя по крайней мере один из перечисленных ниже атрибутов:

– физические (антропометрические, биомеханические атрибуты и т. п.);

– физиологические (частота пульса, температура тела, пульс, электрофизиологические сигналы мозга и т. п.);

– психосоциальные (стрессы, мотивации и т. п.);

– ментальные (знания, опыт, навыки, способности и т. п.);

– перцептивные (слуховая чувствительность, визуальная чувствительность, температурная чувствительность и т. п.);

– эмоциональные (страх, гнев, стыд и т. п.);

– поведенческие (способность взаимодействовать с другими системами и т. п.) [2].

ЦД могут использовать самые разнообразные типы моделей. В этом контексте ЦДЧ можно определить как интегрированную модель, которая позволяет проводить описательную, диагностическую, предиктивную и предписывающую аналитику на основе собранных данных. Для представления моделей можно использовать различные способы. В качестве основных способов представления можно выделить графы знаний и нейронные сети.

ЦДЧ может быть реализован разными способами: в виде обычного программного модуля, сервиса или программного агента. Способ реализации в значительной степени определяется реализуемым функционалом.

Обобщенная структура ЦДЧ как элемента СКФС. Как следует из приведенной классификации, ЦДЧ могут использовать самые разные модели. Обобщенная модель ЦДЧ показана на рис. 3 и включает в себя: репозитарий моделей, процессор запросов и процессор моделей. Репозитарий моделей хранит модели людей, которые рассматриваются в качестве элементов. Каждому человеку ставится в соответствие полимодель [17], модели которой отражают интересы других заинтересованных сторон. Интересам каждой из таких сторон также соответствуют собственные модели в соответствии с точками зрения.

Для построения отдельных моделей могут использоваться разные подходы (графы знаний, аналитические модели, нейронные сети и др.). Сами модели служат предметом отдельного рассмотрения.

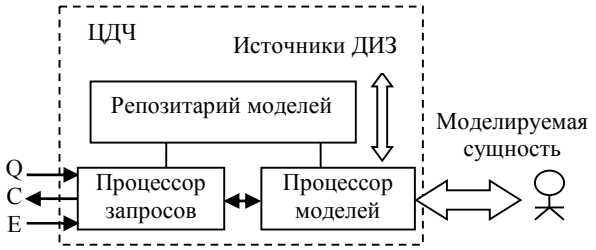

Рис. 3. Обобщенная структура ЦДЧ
Fig. 3. HDT generalized structure

Процессор запросов отвечает за обработку запросов к моделируемой сущности со стороны других сущностей, как находящихся внутри СКФС, так и вне ее. Процессор запросов взаимодействует с другими подсистемами и внешним миром через три интерфейса: Q, C и E. Интерфейс Q (Query interface) отвечает за обработку запросов от других элементов СКФС, интерфейс C (Control interface) необходим для управления, интерфейс E (Environment interface) предназначен для получения информации об окружающей среде.

Процессор моделей отвечает за поддержание моделей, хранящихся в репозитарии в актуальном состоянии, может обрабатывать и выдавать запросы к другим элементам СКФС. Процессор запросов также может работать с внешними хранилищами данных, информации и знаний (ДИЗ). Оба процессора действуют параллельно и асинхронно и поддерживают многозадачный режим.

ЦДЧ – это один из элементов СКФС. Включение человека в качестве элемента переводит систему из класса КФС в класс СКФС. В этом смысле СКФС можно рассматривать как надкласс КФС. Основные принципы построения КФС, основанных на использовании ЦД, рассмотрены в публикациях авторов [18], [19].

Пример использования ЦДЧ в системах управления образовательным контентом. ***Понятие компетенции.*** СКФС представляют собой достаточно широкий класс систем различного назначения. Далее в качестве примера предложенного подхода рассматриваются возможные подходы к построению и использованию ЦДЧ в системах управления образовательным контентом на примере магистерских программ в ИТ-сфере.

В качестве примера рассмотрим возможность применения описанного подхода для построения и поддержания образовательного процесса. Другими словами, речь идет об одной из фаз жизненного цикла человеческого компонента СКФС. Предметом рассмотрения служит процесс подготовки ИТ-специалистов.

Специалиста, в частности инженера, магистра, можно рассматривать как элемент (подсистему), входящий в состав федеративной системы, представляющей собой СКФС. Результатом обучения, практической деятельности или повышения квалификации служит переход в новое компетентностное состояние (КС) (рис. 4). КС описывается с помощью компетентностной модели, которая будет более подробно рассмотрена далее.

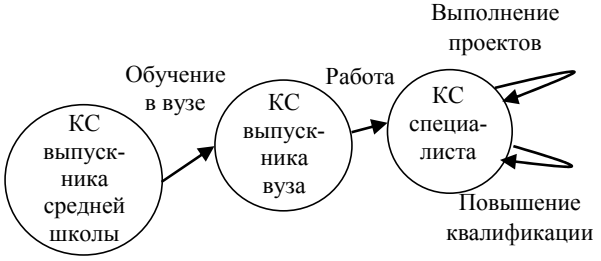

Рис. 4. Компетентностные состояния и переходы между ними
Fig. 4. Competence states and transitions between them

Модель обучения может быть описана в терминах конечного автомата (рис. 5). Подобный автомат можно определить как $\mathbf{A} = \{s_0, S_i, S_k, \text{TT}, \text{EM}\}$, где s_0 – исходное компетентностное состояние (компетентностное состояние абитуриента); S_i – множество промежуточных компетентностных состояний; S_k – конечное компетентностное состояние на момент окончания обучения; TT – таблица переходов, которая определяет порядок изучения модулей, которую можно интерпретировать как систему пререквизитов; EM – выходные компетенции, которые формируются после изучения некоторого образовательного модуля. Аналогичным образом может быть описано компетентностное состояние абитуриента и специалиста.

Описанный автомат имеет фиксированную структуру. Однако, когда речь идет о подготовке в ИТ-сфере, то образовательный контент необходимо постоянно изменять в соответствии с постоянно изменяющимися требованиями потребителей подготавливаемых специалистов. Причем время жизни некоторой компетенции может быть меньше времени подготовки. Другими словами, на протяжении процесса обучения требования к содержанию подготовки могут изменяться не один раз. Кроме того, в качестве потребителей выпускников могут выступать разные организации, которые предъявляют к выпускникам разные требования. Эту ситуацию можно описать посредством использования относительно конечного состояния, в котором при переходе в новое состояние используется новая таблица переходов [20].

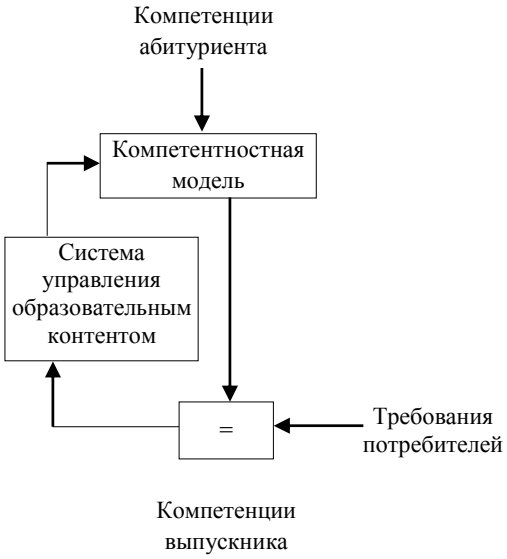

Рис. 5. Автомат, описывающий переходы между компетентностными состояниями
Fig. 5. An automaton describing transitions between competence states

В общем случае компетентностная модель (КМ) – многоуровневая модель, которую можно представить посредством многоуровневого относительно конечного автомата (МОКА), состояниям которого ставятся в соответствие КС, а дугам – переходы между КС.

Относительно конечный автомат (ОКА) – это автомат, входные и выходные сигналы и правила переходов между состояниями которого различны для каждого нового состояния: $A_i = <In_i, Out_i, AS_i, TT_i>$, где A_i – автомат на i-м шаге; In_i – входные сигналы для i-го шага; Out_i – выходные сигналы для i-го шага; AS_i – внутренние состояния для i-го шага; TT_i – таблица переходов для i-го шага.

Компетентностное состояние можно определить как множество компетенций, которыми владеет обучаемый (специалист).

Понятие КС – одно из ключевых понятий для представления ЦДЧ на ментальном уровне. Очевидно, что компетентностная модель – это одна из частных моделей ментального уровня, что позволяет определить ее достаточно формально.

Компетентностная модель. Компетентностная модель описывает процесс получения и накопления компетенций, а также описывается в терминах смены компетентностных состояний.

Компетентностная модель включает такие понятия, как компетенции, компетентностные состояния, смена компетентностных состояний.

Компетентностные модели находят широкое применение как в образовательной, так и в бизнес-среде. Этот термин также активно используется рекрутскими компаниями, которые в определенным смысле выполняют функции моста между университетами и системой образования, с одной стороны, и работодателем, с другой. Таким образом, компетентностные модели могут выступать в качестве общего языка для университета и работодателя. В этом состоит важность и привлекательность использования компетентностного подхода к формированию образовательных программ.

Возвращаясь к самому термину «компетенция», следует отметить наличие огромного числа интерпретаций данного термина, который используется психологами, педагогами, менеджерами и другими специалистами. Фактически, термином «компетенция» обозначаются разные понятия из различных областей знаний, и вряд ли когда-нибудь удастся сформулировать четкое и однозначное определение этого термина. Таким образом, корректное использование данного термина требует наличия его определения, которое работает в данном конкретном контексте. В данном случае эти понятия определяются следующим образом: знание, навык, способность или характеристика, связанные с выполнением профессиональной деятельности на высоком уровне, что позволяет избежать использования таких понятий, как аналитическое мышление, лидерский потенциал. Т. е. термин «компетенция» в данном контексте определяется как способность решать некоторый класс задач или выполнять некоторую работу.

Для определения содержания образовательной деятельности в нашей стране традиционно принято использовать триаду «знать–уметь–иметь представление» (ЗУИ), а не определять через понятия набора компетенций, необходимых для выполнения каких-либо функций, решения задач из соответствующей профессиональной области. В узком смысле компетенция отличается от ЗУИ тем, что вводится дополнительный компонент – мочь, быть в состоянии. Например, речь может идти о возможности с минимальными затратами сменить область профессиональной деятельности, быть способным решать проблемы, возникающие в коллективе. Из приведенных примеров очевидно, что понятие «компетенция» значительно более общее, чем ЗУИ, хотя на нижнем уровне компетенции определяются через набор ЗУИ. Эта

классификация, по мнению авторов, слишком груба. Поэтому представляется целесообразным использовать таксономию Блума [21], которая выделяет шесть уровней:

1. *Знание* – запоминание и воспроизведение изученного материала.

2. *Понимание* – способность к преобразованию материала из одной формы выражения в другую, а также способность к интерпретации материала применительно к некоторой ситуации.

3. *Применение* – умение использовать материал в конкретной ситуации, а также в новых ситуациях.

4. *Анализ* – умение разбить некоторый материал на множество более мелких модулей.

5. *Синтез* – способность комбинировать отдельные элементы, с целью получения некоторой новой сущности.

6. *Оценка* – способность оценивать значение того или иного фактора в конкретной ситуации.

Данная таксономия определяет уровни знания, что очень удобно при использовании итерационных моделей обучения.

Перечисленные уровни могут интерпретироваться как атрибуты компетенции. Основное достоинство данной модели состоит в возможности отображения глубины знаний, что позволяет описывать итерационный характер образования.

Компетентностное состояние описывается в терминах множества компетенций, которые могут изменяться после изучения некоторого модуля: появляется новая компетенция, компетенция переходит на более высокий уровень. Состояние компетенции инкапсулируется в ее атрибутах.

Компетентностные модели могут использоваться для решения двух задач: согласования целей обучения с требованиями потребителей специалистов, т. е. промышленности, и формирования учебных планов.

Решение первой задачи предполагает сравнение модели компетенций выпускника с моделью требований работодателя, которая также представляет собой компетентностную модель.

Решение второй задачи предполагает построение бизнес-процесса, обеспечивающего переход от исходного компетентностного состояния (КС абитуриента) в конечное КС (КС выпускника), которое соответствует требованиям потенциальных работодателей.

Для решения этих двух связанных между собой задач предлагается следующий подход.

Для представления компетентностной модели предлагается использовать графы знаний или графы свойств [22]. Каждому КС соответствует собственный граф. При переходе в новое КС граф перестраивается посредством добавления новых вершин.

Потребители, в качестве которых выступают работодатели или менеджеры образовательных программ более высокого уровня, формируют свои требования к выпускникам в форме перечня компетенций с указанием их уровня $К = \{к_0, к_i, к_n\}$, где каждая компетенция имеет атрибут, определяющий ее уровень.

Множество компетенций К может быть построено в терминах соответствующего Board of knowledge (BOK) [23]. Однако BOK – это текстовый документ. Напрямую его можно использовать, если применять большие языковые модели [24]. Очевидно, что в будущем так и будут поступать. Однако в настоящее время с учетом существующих реалий предпочтительным представляется использование онтологического подхода [25]. Представление существующих BOK в форме онтологий – это решаемая задача, не требующей больших затрат. Однако в этом плане возникают две проблемы. Первая проблема состоит в том, что в качестве потребителей выпускников вузов выступают разные организации, у которых разные требования, причем обычно перечень организаций постоянно меняется. Вторая проблема состоит в том, что сами BOK регулярно с интервалом 1–2 г. обновляются, причем обновления, по крайней мере в ИТ-сфере, могут быть очень значительными. Если принять во внимание тот факт, что срок обучения по программе инженерной подготовки составляет 5–6 лет, то очевидно, что программа должна иметь элемент динамизма, т. е. быть способной адаптироваться к не полностью известным требованиям.

Вторая задача состоит в формировании учебного плана, состоящего из имеющихся в распоряжении университета моделей, которые связаны между собой через пререквизиты. Учебный процесс представляется бизнес-процессом (БП), который в общем случае динамический. Его структура может изменяться при изменении набора требуемых потенциальными работодателями компетенций. БП строится на основе графа знаний с учетом требований потенциальных работодателей и других ограничений – правил формирования ученого плана, наличия преподавателей и т. п.

Заключение. Переход от КФС, которые по своей природе – антропогенные системы, к СКФС можно рассматривать как следующую фазу развития прикладных систем. Ключевая проблема состоит в крайне высокой сложности построения модели человека как элемента СКФС. Вызывает большое сомнение построение достаточно полной модели человека в обозримом будущем. Однако построение частных моделей вполне возможно. Это относится, в частности, к моделям ментального уровня, которые активно используются для описания процесса подготовки специалистов, по крайней мере ИТ-специалистов. Один из возможных подходов к построению СКФС – это использование ЦД и, в частности, ЦДЧ. Если речь идет о ЦД студента как элемента образовательного процесса, то при построении ЦД студента могут использоваться либо графы знаний, либо нейронные сети. Использование графов знаний представляет собой простейшее решение. Однако автоматическое построение графов знаний крайне затруднительно по причине отсутствия онтологий, которыми могут пользоваться как университеты, так и промышленность. Более радикальным решением представляется использование нейронных сетей, в частности генеративных нейронных сетей. В рамках нейросетевого подхода для автоматического построения модели требований к выпускнику скорее всего потребуется использовать большие языковые модели.

Список литературы

1. Auer M. E., Ram B. K. Cyber-physical systems and digital twins // Proc. of the 16th Int. Conf. on Remote Eng. And Virrtual Instrumentation. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 868 p. doi: 10.1007/978-3-030-23162-0.

2. The digital twin of humans an interdisciplinary concept of digital working environments in industry 4.0 / I. Gräßler, G. W. Maier, E. Steffen, D. Roesmann. Springer Nature Switzerland AG, 2023. 269 p. doi: 10.1007/978-3-031-26104-6.

3. Cantot P., Luzeaux D. Simulation and modeling of systems of systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 378 p.

4. Jamshidi M. Systems of systems engineering. Principles and applications. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 480 p.

5. Human digital twin: a survey / Y. Lin, L. Chen, A. Ali, Ch. Nugent, I. Cleland, R. Li, J. Ding, H. Ning // J. of Cloud Comp. 2024. Vol. 13, no. 1. URL: https//www.researchgate.net/publication/383148172_Human_digital_twin_a_survey (дата обращения: 17.03.2025). doi: 10.1186/s13677-024-00691-z.

6. Digital twin driven smart design / Fei Tao, Ang Liu, Tianliang Hu, A. Y. C. Nee. Elsevier Inc. 2020. 358 p. URL: https://books.google.ru/books?id=wMjhDwAAQBAJ&redir_esc=y (дата обращения: 17.03.2025).

7. Synthesis of multi-stakeholder run time dynamic digital twins and dynamic digital twins networks / R. Delhibabu, A. Vodyaho, D. I. Ignatov, N. Zhukova, M. Chervoncev. 52 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/371571115_Synthesis_of_multi-stakeholder_run_time_dynamic_digital_twins_and_dynamic_digital_twins_networks (дата обращения: 17.03.2025).

8. Blair G. S. Digital twins of the natural environment // Patterns. 2021. Vol. 2, no. 10. doi: 10.1016/j.patter.2021.100359. URL: https://www.researchgate.net/publication/355272006_Digital_twins_of_the_natural_environment (дата обращения: 17.03.2025).

9. Fahad Sh. Modeling human group behavior in virtual worlds. Fall Term, 2011. 201 p. URL: https://ial.eecs.ucf.edu/pdf/ShahPhD2011.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

10. Wu Y., Zhang K., Zhang Y. Digital twin networks: A survey // IEEE Internet of Things J. 2021. Vol. 8, no. 18. P. 13789–13804. doi: 10.1109/jiot.2021.3079510.

11. A comprehensive review of digital twin – Part 1: modeling and twinning enabling technologies / A. Thelen, X. Zhang, O. Fink, Y. Lu, S. Ghosh, B. D. Youn, M. D. Todd, S. Mahadevan, Ch. Hu, Z. Hu. URL: https://www.researchgate.net/publication/363128688_A_Comprehensive_Review_of_Digital_Twin_--_Part_1_Modeling_and_Twinning_Enabling_Technologies (дата обращения: 17.03.2025).

12. Nath S. V., Schalkwyk van P. Building industrial digital twins: Design, develop, and deploy digital twin solutions for real-world industries using Azure Digital Twins. Packt Publishing: Birmingham, UK, 2021. 286 p.

13. Krügera S., Borsato M. M. Developing knowledge on digital manufacturing to digital twin: A bibliometric and systemic analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/341379109_Developing_knowledge_on_Digital_Manufacturing_to_Digital_Twin_a_bibliometric_and_systemic_analysis (дата обращения: 17.03.2025).

14. Vodyaho A., Zhukova N., Subbotin A. Fahem Anaam towards agile digital threads architecting // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 8. P. 3078. doi: 10.3390/s22083078.

15. Садовский В. Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. М.: Наука, 1974. 280 с.

16. Бутырский Е. Теория систем и системный анализ. Основы, концепции, методы. Германия: Palmarium Academic Publishing. Saarbrücken, 2012. 680 с.

17. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 408 с.

18. About one approach to using dynamic models to build digital twins / A. I. Vodyaho, N. A. Zhukova, Yu. A. Shichkina, F. Anaam, S. Abbas // J. Designs. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 1–24. URL: https://www.mdpi.com/2411-9660/6/2/25 (дата обращения: 17.03.2025).

19. Использование динамических цифровых двойников при построении киберфизических систем / В. Я. Ананьева, А. И. Водяхо, Н. А. Жукова, М. А. Червонцев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 44–55. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-44-55.

20. Osipov V., Zhukova N., Vodyaho A. About one approach to multilevel behavioral program synthesis for television devices. // Int. J. of computers and communications. 2017. Vol. 11. P.17–25.

21. Bloom B. S. Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals. NY: Longmans, 1956. 403 p.

22. Blumauer A., Nagy H. The knowledge graphs cookbook. Vienna, Austria: Recipes that work Semantic Web Company, 2020. 256 p.

23. IEEE Computer Society. SWEBOK Evolution URL: https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/professional-educational-activities/software-engineering-committee/swebok-evolution (дата обращения: 17.03.2025).

24. Iusztin P., Labonne M. LLM Engineer's: Master the art of engineering large language models from concept to production. Handbook. UK, Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2024. 522 p.

25. Allemang D., Hendler J., Gandon F. Semantic Web for the working ontologist: Effective modeling for Linked Data, Rdfs, and Owl. 3rd ed. Association for Comp. Machinery. NY, 2020. 494 p.

Информация об авторах

Ананьева Варвара Яновна – аспирант, ст. преподаватель кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: varvara.spb99@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-2074-5438

Водяхо Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: aivodyaho@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0933-0933

Советов Борис Яковлевич – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: bisovetov@etu.ru

Цехановский Владислав Владимирович – канд. техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vvcehanovsky@mail.ru

Вклад авторов:

Ананьева В. Я. – оценка современного состояния исследований и разработок в области ЦДЧ и СКФС, использующих ЦДЧ; работа над использованием цифрового двойника студента при построении образовательных траекторий студентов, обучающихся по магистерским и инженерным программам в сфере информационных технологий.

Водяхо А. И. – формирование предмета рассмотрения статьи, описание проблем, связанных с созданием цифрового двойника человека в качестве элемента социо-киберфизической систем, описание эталонной модели такой системы.

Советов Б. Я. – формирование предмета рассмотрения статьи, работа над подходом к использованию ЦД в рамках СКФС.

Цехановский В. В. – формирование предмета рассмотрения статьи, работа над подходом к использованию ЦД в рамках СКФС, выбор инструмента для описания образовательного процесса.

References

1. Auer M. E., Ram B. K. Cyber-physical systems and digital twins // Proc. of the 16th Int. Conf. on Remote Eng. And Virrtual Instrumentation. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 868 p. doi: 10.1007/978-3-030-23162-0.

2. The digital twin of humans an interdisciplinary concept of digital working environments in industry 4.0 / I. Gräßler, G. W. Maier, E. Steffen, D. Roesmann. Springer Nature Switzerland AG, 2023. 269 p. doi: 10.1007/978-3-031-26104-6.

3. Cantot P., Luzeaux D. Simulation and modeling of systems of systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 378 p.

4. Jamshidi M. Systems of systems engineering. Principles and applications. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 480 p.

5. Human digital twin: a survey / Y. Lin, L. Chen, A. Ali, Ch. Nugent, I. Cleland, R. Li, J. Ding, H. Ning // J. of Cloud Comp. 2024. Vol. 13, no. 1. URL: https//www.researchgate.net/publication/383148172_Human_digital_twin_a_survey (data obraschenija: 17.03.2025). doi: 10.1186/s13677-024-00691-z.

6. Digital Twin Driven Smart Design / Fei Tao, Ang Liu, Tianliang Hu, A. Y. C. Nee. Elsevier Inc. 2020. 358 p. URL: https://books.google.ru/books?id=wMjhDwAAQBAJ&redir_esc=y (data obraschenija: 17.03.2025).

7. Synthesis of multi-stakeholder run time dynamic digital twins and dynamic digital twins networks / R. Delhibabu, A. Vodyaho, D. I. Ignatov, N. Zhukova, M. Chervoncev. 52 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/371571115_Synthesis_of_multi-stakeholder_run_time_dynamic_digital_twins_and_dynamic_digital_twins_networks (data obraschenija: 17.03.2025).

8. Blair G. S. Digital twins of the natural environment // Patterns. 2021. Vol. 2, no. 10. doi: 10.1016/j.patter.2021.100359. URL: https://www.researchgate.net/publication/355272006_Digital_twins_of_the_natural_environment (data obraschenija: 17.03.2025).

9. Fahad Sh. Modeling human group behavior in virtual worlds. Fall Term, 2011. 201 p. URL: https://ial.eecs.ucf.edu/pdf/ShahPhD2011.pdf (data obraschenija: 17.03.2025).

10. Wu Y., Zhang K., Zhang Y. Digital twin networks: A survey // IEEE Internet of Things J. 2021. Vol. 8, no. 18. P. 13789–13804. doi: 10.1109/jiot.2021.3079510.

11. A comprehensive review of digital twin – Part 1: Modeling and twinning enabling technologies / A. Thelen, X. Zhang, O. Fink, Y. Lu, S. Ghosh, B. D. Youn, M. D. Todd, S. Mahadevan, Ch. Hu, Z. Hu. URL: https://www.researchgate.net/publication/363128688_A_Comprehensive_Review_of_Digital_Twin_--_Part_1_Modeling_and_Twinning_Enabling_Technologies (data obraschenija: 17.03.2025).

12. Nath S. V., Schalkwyk van P. Building industrial digital twins: Design, develop, and deploy digital twin solutions for real-world industries using Azure Digital Twins. Packt Publishing: Birmingham, UK, 2021. 286 p.

13. Krügera S., Borsato M. M. Developing knowledge on digital manufacturing to digital twin: A bibliometric and systemic analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/341379109_Developing_knowledge_on_Digital_Manufacturing_to_Digital_Twin_a_bibliometric_and_systemic_analysis (data obraschenija: 17.03.2025).

14. Vodyaho A., Zhukova N., Subbotin A. Fahem Anaam towards agile digital threads architecting // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 8. P. 3078. doi: 10.3390/s22083078.

15. Sadovskij V. N. Osnovanija obshhej teorii sistem. Logiko-metodologicheskij analiz. M.: Nauka, 1974. 280 s. (In Russ.).

16. Butyrskij E. Teorija sistem i sistemnyj analiz. Osnovy, koncepcii, metody. Germanija: Palmarium Academic Publishing / Saarbrücken, 2012. 680 s. (In Russ.).

17. Ohtilev M. Ju., Sokolov B. V., Jusupov R. M. Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnicheskih ob#ektov. M.: Nauka, 2006. 408 s. (In Russ.).

18. About one approach to using dynamic models to build digital twins / A. I. Vodyaho, N. A. Zhukova, Yu. A. Shichkina, F. Anaam, S. Abbas // J. Designs. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 1–24. URL: https://www.mdpi.com/2411-9660/6/2/25 (data obraschenija: 17.03.2025).

19. Ispol'zovanie dinamicheskih cifrovyh dvojnikov pri postroenii kiberfizicheskih sistem / V. Ja. Anan'eva, A. I. Vodjaho, N. A. Zhukova, M. A. Chervoncev // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 3. S. 44–55. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-44-55. (In Russ.).

20. Osipov V., Zhukova N., Vodyaho A. About one approach to multilevel behavioral program synthesis for television devices. // Int. J. of computers and communications. 2017. Vol. 11. P.17–25.

21. Bloom B. S. Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals. NY: Longmans, 1956. 403 p.

22. Blumauer A., Nagy H. The knowledge graphs cookbook. Vienna, Austria: Recipes that work Semantic Web Company, 2020. 256 p.

23. IEEE Computer Society. SWEBOK Evolution URL: https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/professional-educational-activities/software-engineering-committee/swebok-evolution (data obraschenija: 17.03.2025).

24. Iusztin P., Labonne M. LLM Engineer's: Master the art of engineering large language models from concept to production. Handbook. UK, Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2024. 522 p.

25. Allemang D., Hendler J., Gandon F. Semantic Web for the working ontologist: Effective modeling for linked Data, Rdfs, and Owl. 3rd ed. Association for Comp. Machinery. NY, 2020. 494 p.

Information about the authors

Varvara Ya. Ananeva – postgraduate student, Senior lecturer of the Department of Information Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: varvara.spb99@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-2074-5438

Alexander I. Vodyaho – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: aivodyaho@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0933-0933

Boris Ya. Sovetov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: bisovetov@etu.ru

Vladislav V. Tsekhanovsky – Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: vvcehanovsky@mail.ru

Author contribution statement:
Ananeva V. Ya. – assessment of the current state of research and development in the field of HDT and SCPS based on HDT; work on using the student's digital twin in building educational trajectories for students studying master's and engineering programs in the field of information technology.
Vodyaho A. I. – the formation of the subject of the article, description of the problems associated with the creation of human digital twin as an element of socio-cyberphysical systems, description of the reference model of such a system.
Sovetov B. Ya. – the formation of the subject of the article, work on approach to the use of digital twins within the framework of the SCPS.
Tsekhanovsky V. V. – the formation of the subject of the article, work on approach to the use of digital twins within the framework of the SCPS, choosing tool for describing the educational process.

Статья поступила в редакцию 18.03.2025; принята к публикации после рецензирования 02.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 18.03.2025; accepted 02.04.2025; published online 30.06.2025.