

ВОПРОС ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИНА «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК» В СОВРЕМЕННОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЩЕСТВЕ

THE QUESTION OF THE USE OF THE TERM «DIGITAL DOUBLE» IN THE MODERN INFORMATION SOCIETY

**A. Chernigin
S. Plotnikov**

Summary. Introduction. The article is devoted to the problems in the modern information space related to the definition and application of the term «digital twin». The article analyzes the modern general definition of a digital double using the semantics of language constructions. The assessment of the relevance of the modern concept and the possibility of useful application of the concept of «digital twin» in various sectors of human activity is given. The correctness of the conducted research is confirmed by means of testing with the involvement of experts. The purpose of the work is to determine the spectrum of tasks of modern engineering, where clarification of the conceptual space of the definition of «digital twin» is required.

A modern concept. Consideration of the concept under study allows us to identify key points, determine the criteria of conformity and types of the term in question, generally accepted in modern society. The information obtained allows us to form an idea of an abstract idea of the necessary and desired capabilities of doubles.

Problems of the concept. Applying semantic methods to previously defined data, the definition and criteria of digital doubles with their isolation and transformation into a formula expression are investigated. The validity of the proposed expressions is considered in practice. An example of the problem associated with the vagueness of the definition and emerging contradictions in the classical concept of a digital double is demonstrated. The actual issues of the use of the term in the modern information society are determined

Testing with the involvement of experts. For a detailed study of the modern concept of the term, testing was carried out by a group of experts formed taking into account the application of this technology in various fields. The conducted research confirmed the problems and differences in the representation of doubles, and also allowed us to talk about the need for clarification, refinement and subsequent adaptation to the modern field of computer graphics and further development of the term. expert testing allows us to draw additional conclusions that at the moment, from the point of view of terminology, the idea of digital twins causes difficulties for information technology specialists. Reworking or clarifying the term will improve interdisciplinary interaction in various fields and at different levels of human interaction.

Keywords: industry 4.0, Digital twin, information systems and technologies, computer graphics, semantics.

Чернигин Андрей Николаевич

Аспирант, ассистент, МИРЭА —
Российский технологический университет
Usller@yandex.ru

Плотников Сергей Борисович

Кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
Plotnikovsb@mail.ru

Аннотация. Введение. Статья посвящена проблемам в современном информационном пространстве, связанным с определением и применением термина «цифровой двойник». В статье анализируется современное общее определение цифрового двойника с использованием семантики языковых конструкций. Дается оценка актуальности современной концепции и возможности полезного применения понятия «цифровой двойник» в различных секторах деятельности человека. Корректность проведенного исследования подтверждается по средствам тестирования с привлечением экспертов. Целью работы является определение спектра задач современной инженерии, где требуется уточнение понятийного пространства определения «цифровой двойник».

Современная концепция. Рассмотрение исследуемого понятия, позволяет выявить ключевые моменты, определить критерии соответствия и виды рассматриваемого термина, общепринятые в современном обществе. Полученные сведения, позволяют сформировать представление об абстрактном представлении о необходимых и желаемых возможностях двойников.

Проблематика концепции. Применяя семантические методы к определенному ранее данным, исследуется определение и критерии цифровых двойников с выделением и преобразованием их в формульное выражение. Рассматривается на практике правомерность выдвигаемых выражений. Демонстрируется пример проблемы, связанной с расплывчатостью определения и возникающие противоречия в классической концепции цифрового двойника. Определены актуальные вопросы применения термина в современном информационном обществе

Тестирование с привлечением экспертов. Для детального изучения современного представления о термине проводилось тестирования группой экспертов, сформированной с учетом применения данной технологии в различных сферах. Проведённое исследование, подтвердило проблемы и различия в представлении двойников, а также позволило говорить о необходимости уточнения, доработки и последующей адаптации к современной сфере компьютерной графики и дальнейшего развития термина. экспертное тестирование позволяет сделать дополнительные выводы, что на данный момент, с позиции терминологии представление о цифровых двойниках вызывает затруднения у специалистов по информационным технологиям. Переработка или уточнение термина позволит улучшить междисциплинарное взаимодействие в различных сферах и на разных уровнях человеческого взаимодействия.

Ключевые слова: индустрия 4.0, Цифровой двойник, информационные системы и технологии, компьютерная графика, семантика.

Введение

Цифровые двойники являются важным концептуальным понятием, методологией и технологией в современном информационном обществе. На данном этапе развития общества, науки и промышленности, цифровые двойники являются важным научным и инженерным базисом для перехода к промышленной революции нового поколения, а именно индустриализации 4.0.

Многие ведущие разработчики и техно-гиганты, такие как Google, Apple и AMD разрабатывают собственный инструментарий для создания цифровых двойников с целью как научных исследований, разработки, тестирования сложных систем, так и сопровождения их производства и использования. Это обеспечивает быстрый и эффективный доступ к требуемым цифровым версиям своих изделий, большим объемам данных и информации, в том числе о взаимодействии с техносферой [1], [2], [3]. Несмотря на то, что компании сообщают о проведении исследований по созданию специализированных цифровых ассистентов, еще не было официальных заявлений в этом направлении о научных результатах, инженерных решениях и эффективном применении этих решений. Несомненно, что не только современный бизнес всех секторов экономики, но и научное общество заинтересованно в результатах исследований и использования цифровых двойников, цифровых помощников.

Технологии «цифровой двойник» могут обеспечить во многих случаях конкурентные преимущества, например, при, так называемом прогнозируемом обслуживании, когда виртуальные копии осуществляют постоянные, дистанционные взаимодействия со своими физическими прототипами, собирая различную информацию о состоянии с помощью датчиков. Анализ собранных данных позволяет оптимизировать работу, прогнозировать возможные поломки и т.п. [4], [5].

По существу, цифровые двойники становятся значимой частью современного мира, во многом определяющим темпы технологического развития, поэтому важно, именно сейчас на понятийном уровне, например, для спектра научных и инженерных задач компьютерной графики, решить задачу, связанную с оценкой, пониманием и границами определения «цифровой двойник» [6].

В обществе уже утвердилось определение цифрового двойника, как аналога реального объекта, который содержит абсолютно всю информацию о нем. Однако, на современном этапе развития науки и техники данная отличительная особенность реализуется лишь частично, в частности, ввиду ограниченности знаний о любых природных или рукотворных объектах и возможности вычислительных средств, моделирующих объекты.

Современная концепция

Изначальная концепция цифрового двойника подразумевает процесс получения цифровой копии физического объекта или процесса, с целью оптимизации эффективности создания и применения данного объекта. Другой весомой частью понятия цифрового двойника являются прототипы, или же до-физическая сущность, используемая с целью получения первичных данных об объекте исследования, что позволяет выявить критические заблуждения и ошибки, тем самым минимизируя затраты, связанных с реализацией технически сложных устройств в реальности. В этом смысле, полезно обобщенное и структурированное понятие, предложенное Майклом Гривзом в начале 21го века (представлено далее) [7].

Доцифровой двойник, или прототип — виртуальное представление разрабатываемой системы или процесса, используемый для выявления фундаментальных проблематик, до создания физического воплощения.

Цифровой двойник экземпляра — она же виртуальная модель, имеет в своей основе объект копирования, но чаще всего получает данные от однократного считывания объекта различными методами. В отличие от прототипа, цифровой экземпляр в подавляющем большинстве используется для дальнейшей работы вне естественной среды функционирования, в тех случаях, когда нет возможности предоставить всю систему целиком или в этом нет необходимости.

Умные цифровые двойники или агрегированные — самый совершенный двойник с точки зрения развития и передачи свойств от наследуемого существующего объекта. Основное преимущество — прямая связь и непрерывное получение данных, и само обновление двойника с использованием, например, датчиков и интернета вещей.

Общие требования, предъявляемые к цифровым двойникам:

- цифровой двойник должен иметь внешнее сходство;
- виртуальный продукт должен вести себя реалистично, другими словами, повторять поведения реального или симулировать поведение реального;
- цифровой двойник должен обладать возможностью динамического изменения представления о реальном физическом объекте или процессе.

Проблематика концепции

Опираясь на приведенные критерии и типы, с определенной долей приближения, можно структурировать данные о любом цифровом двойнике, однако, на прак-

тике в компьютерной графике, всё чаще, употребляется знак равенства, между терминами «цифровой двойник» и «3D модель». Рассмотрим правомерность этой позиции подробнее.

Используя критерии двойника, возможно это проверить для каждого случая, учитывая проблему, возникающую в момент масштабирования. В случае рассмотрения общей картины с применением семантики [8], получено соотношение:

$$(\exists p_1 \subset d\{x_1, x_2, \dots, x_n\}), (d \rightarrow D(p_1)), \quad (1)$$

где p — критерии цифрового двойника, а d — объект, называемый цифровым двойником, x — параметры объекта.

Из чего следует, что при масштабировании любой виртуальный объект будет цифровым двойником, и принадлежность зависит только от размера $d\{\dots\}$ множества переменных, из чего следует второе соотношение:

$$\lim_{x_n \rightarrow \infty} d\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \ni D(p_1). \quad (2)$$

Рассмотрим на практике правомерность данного утверждения. Любая цифровая трехмерная модель копирует реальный объект или является следствием агрегации нескольких независимых, таким образом модель отвечает первому критерию внешнего соответствия. С другой стороны, не существует возможности досконально повторить реальный объект, скопировав «каждый его атом» и перенеся в виртуальное пространство, однако развитие технологий позволяет добиваться все большего совпадения копии с реальным объектом, системой или комплексом. Из этого следует неразрешенная неопределенность: «в какой момент, копия системы достаточна, чтобы соответствовать внешнему сходству?».

Логичным ответом может является — как только внешнего сходства и поведения хватает для решения задачи, с данной допустимой погрешностью, то мы можем утверждать, что цифровой объект выполняет свои задачи и может считаться двойником:

$$(\exists c_1\{x_1, \dots, x_n\} \in c_2\{x_1, \dots, x_n\}), (p_n \rightarrow p_1) \quad (3)$$

То есть, если существует такой набор c_1 параметров x , предъявляемых для соответствия задач объекта, в наборе c_2 параметров объекта, то выполняется один или нескольких критериев цифрового двойника p_1 . Важным замечанием является — невозможность утверждать, что

$$(\forall x_n \notin y\{p_1^{(m)}, p_2^{(m_2)}, \dots, p_s^{(m_s)}\}) \quad (4)$$

множество y параметров не является подмножеством всех параметров x . Другими словами, нет полной уве-

ренности, что каждый параметр, содержащийся в задаче или объекте, до конца воссоздан для реализации цели задачи и не будет отличаться в своем физическом или ином свойстве, а также не является итогом другого явления или события, что может повлиять на корректность и достоверность измерений. Тем самым без использования бесконечного множества переменных состояний системы невозможно создать абсолютно полного двойника [9]. Добавления множества параметров тоже не может являться решением проблемы, т.к. вычислительные ресурсы конечны и одновременно с этим, невозможно перенести на них всю бесконечность переменных. В таком случае без использования упрощенного представления системы двойника и игнорирования ряда факторов, параметров и свойств, невозможно получить решение наших задач.

Проявление противоречий и неопределенностей показывает многогранность и неоднозначность исследуемого вопроса. При рассмотрении критерия внешнего соответствия, взаимосвязано с ним проявляется следующий критерий — «объект должен вести себя реалистично...», одновременно не получено исчерпывающее решение проблемы, что является внешним сходством и на сколько оно должно быть досконально воссоздавать объект, аналогично с реалистичностью поведения. Если продолжить углубление в детали и попытаться смоделировать двойника, который будет отражать систему двойников, другими словами, рекурсией самого двойника, то мы получаем еще более сложную систему, как для расчетов, так и для определения критериев, возникает парадокс: «рекурсивного двойника». В случае игнорирования условия отображения бесконечного повторения двойника внутри копируемого двойника, возможно получить решение для задачи копирования, если заранее определена глубины рекурсии, но остается вопрос о корректности воспроизведения реального объекта.

По следующему критерию цифрового двойника — «динамичность», возникают две основных неопределенности.

Какой критерий динамичности цифрового двойника? Должен ли он обновляться по возможности или под влиянием условий? Другими словами, при выполнении каких условий, он должен непрерывно соответствовать реальному прототипу, досконально копируя его как внешне, так и в параметрах свойств, а в каких моментах может остановить процесс симуляции поведения объекта, с целью углубления анализа о состоянии объекта в конкретный промежуток времени.

Ввиду фундаментальности определения цифрового двойника, происходит пересечение и отражение аналогичных проблем в других областях, одна из которых философия и тема: «Парадокс корабля Тесея». Если наш

двойник не должен быть статичным, то в какой момент при очередном изменении в свойствах или параметрах двойника он станет новым двойником?[10]

Рассмотрим ЦД реального объекта, при преобразовании выше приведенных уравнений может быть получена следующая зависимость:

$$(\exists p_1 \subset d\{x_1, x_2, \dots, x_n\}), (d \rightarrow D(p_1)),$$

Если $p_1 \neq p_2$

$$(\exists p_2 \subset d\{x_1, x_2, \dots, x_n\}), (d \rightarrow D(p_2)) \quad (5)$$

где в случае изменении критериев в наборе функций объекта p_2 , объект все еще остается цифровым двойником, если в нем выполняются изначальные критерии цифрового двойника. Если изменился набор, используемый для подтверждения первоначального термина, то двойник будет являться новым $D(p_2)$ с отличительными свойствами. Важным остается момент, что данное условие выполняется при наборе критериев p_2 не равны первоначальным p_1 . Таким образом набор параметров может служить фактором изменения двойника, замена объекта копирования по причинно-следственной связи приведет к получению нового цифрового двойника. Можно выразить суждение, что «если у объекта меняются только величина в характеристике одного или нескольких параметров, но остается неизменным набор этих параметров, то объект соответствует параметру динамичности». Другими словами, данное суждение не противоречит выдвинутому ранее уравнением.

Проблема, вытекающая из этого, заключается в определении пределов объекта копирования. Рассмотрим ее на примере компьютерной графики [11], если объект изменил только форму в случае цифровой двойник, который симулирует геометрические примитивные фигуры. При изменении примитива, например, октаэдра на сферу, это является изменением геометрической фигурой на аналогичную, другими словами, было изменена характеристика параметра, а не сам параметр. Пример соответствует параметру динамичности системы с точки зрения критериев двойников. Но при выполнении задачи поиска радиуса или объема фигуры необходимо изменить метод подсчета, так как он различается для разных фигур, применение формулы поиска объема, приведет к неверному решению. Следовательно, двойник не будет себя реалистично вести, что противоречит второму критерию соответствия двойнику. В случае изменения самого параметра — «формула расчета объема» будет получен новый двойник, так как он использует новые свойства и правила. Одновременно с этим используется старый цифровой двойник, который взаимодействует с геометрическими примитивами.

Данный пример является демонстрацией проблемы, связанной с расплывчивостью определения [12] и одновременно возникающих внутри самих критериев противоречий. В случае более углубленного анализа двойника, можно заметить следующий паттерн, если первоначально был создан двойник геометрических примитивов, то он по определению должен был носить в себе все свойства, всех примитивов, тем самым позволяя заменять фигуры на другие. Противоречие заключается уже в самом описании этого двойника, т.к. нет точных и конкретных критерием того, что подразумевается и где будет использоваться данный двойник. В случае использования математических формул фигур, при изменении будет получено ложное решение для сферы. Противоположно предыдущему примеру, если задача заключается, в визуальном отображении объекта на основе математических функций, то параметр, в части точности размеров, уже не является критическим недостатком и не влияет на выполнение поставленных задач. Данные примеры иллюстрируют критическую важность в части точного определение задач и области последующего применения.

Невозможность комплексного описания такого объекта, как цифровой двойник и расплывчивость самого определения двойника свидетельствует о поверхностном отражении самого понятия и, вследствие этого, появлением трудности в коммуникации разных агентов: человек—человек, человек—цифровое устройство, устройство—устройство.

Развитие общества, науки и инженерий, одни термины и определения меняются на другие, более детально отражающие задачи познания окружающего мира. Учитывая изложенное ранее, видятся задачи разрешения следующих самых актуальных вопросов применения термина «цифровой двойник» с учетом современных тенденций в информационных технологиях:

- Где находится граница, того, что можно называть цифровыми двойниками?
- Возможно ли считать всё, что смежно с технологиями цифровизации — двойником в той или иной степени, если отвечает критерию динамичности?
- Является ли, цифровой двойник в современном искусстве, проявлением творческой составляющей человека, который использует цифровой двойник компьютерной графики, как отражение своих мыслей, идей и мышления или является ошибочным выражением, которое не относится к области двойников?
- NFT токен (невзаимозаменяемый токен) — это цифровые двойники классического искусства и творчества или циклический тупик технологий?
- Точность определения в части критериев соответствия цифрового двойника, помогут решить существующие проблемы или послужат основой для еще большего числа новых?

— Может ли принцип получения и создания цифровых двойников влиять на их определение?

Искусственный интеллект или чаще употребляемый термин AI в данный момент является одним из самых острых моментов развития современных технологий [13], который вызывает самые большие этические споры в различных направлениях технического прогресса. Область двойников не стала исключением, последний вопрос является отражением проявления в данной области. Факт признания или не признания равноценности созданных двойников машиной без участия людей, может кардинально, изменить представление о сути двойников.

В связи с разными толкованиями термина «цифровой двойник» наблюдается недопонимание как в межличностном взаимодействии людей, так и появление, в следствие этого ошибок, например, при создании больших многоагентных системах [14], где применяются автоматизированные системы наравне с людьми. На данный момент проблема качественной коммуникации является основной для термина «цифровой двойник».

Тестирование с привлечением экспертов

Для подтверждения или опровержения ранее выдвинутых предположений было проведено тестирование отобранными экспертами [15], [16]. Состав экспертной комиссии:

- 2 эксперта, использующие в работе цифровые двойники предприятия. Данные эксперты работают с двойниками предприятий и систем производственных цепочек, а также разрабатывают данные системы. Они входят в изначальную область, которая была первоначально описана в классической концепции о ЦД [7];
- 2 эксперта-аналитика, больших данных в исследованиях социальных процессов; эксперты использующие цифровые двойники систем для обработки, анализа и последующего прогнозирования событий [2], [3];
- 3 эксперта, работа которых связана с цифровыми двойниками компьютерной графики, отличие которых от остальных заключается в специализации двойников для использования в визуальном отображении [17];
- 1 эксперт — с творческой работой по созданию художественных изображений в области современного искусства и цифровых технологий [18].

Состав экспертов был основан на предварительном анализе предметной области, а также на выделение основных затрагиваемых областей применения и использования цифровых двойников. Области были определены как гуманитарно-социальная, информаци-

онно-техническая, творческо-художественная и производственно-технологическая.

Обсуждения между экспертами в момент проведения тестирования отсутствовали. Вопросы были разделены на 3 типа, на каждый из которых эксперту предлагалось дать один или несколько ответов на свое усмотрение:

- Что по мнению эксперта может считаться цифровым двойником — сформированный пример готовой системы или объекта на основе критериев цифрового двойника?
- Что из продемонстрированного может соответствовать термину ЦД — графическая иллюстрация внешнего представления или проявления визуализации цифрового двойника?
- Какая классификация, по мнению эксперта отражает термин ЦД? Блок вопросов, связанных с делением и систематизацией самих цифровых двойников, а также свойств, которыми должен обладать продукт, для получения статуса «Цифровой двойник»?

С целью снижения влияния эффекта «Барнума-Форера» (эффект субъективного подтверждения) [19], каждый тип вопросов включал в себя несколько одинаковых вопросов, с разным соотношением общих представлений о цифровом двойнике.

По результатам проведенного тестирования (рис. 1), эксперты единогласно сошлись только по одному пункту — виртуальная 3D модель реального объекта может считаться цифровым двойником. Утвердительный ответ в данном вопросе связывается с самым простейшим представлением о цифровых двойниках. Виртуальная модель уже является цифровым воплощением объекта, наследуя внешние свойства реального объекта, тем самым демонстрируя два параметра соответствия термину «цифровой двойник»: внешнее соответствие и реалистичное поведение, в данном случае без уточнения задачи двойника. Стоит так же отметить, что в данном вопросе вторым, по числу отданных голосов, стал цифровой двойник производственного цикла, что свидетельствует о корреляции термина «цифровой двойник» и «производство» в представлении людей.

Визуализация цепочки поставок предприятия, представленная в следующем наборе (рис. 2), может считаться цифровым двойником, единогласно признали эксперты. Данный вопрос отображает не только единое согласие экспертов по одному из примеров, а одновременно с этим, ставит под сомнение ряд систем, которые могут считаться цифровым двойником. С учетом предыдущего вопроса, можно заметить корреляцию термина ЦД и связанных с производством аспектов, одновременно с этим, критическое расхождение по остальным примерам, говорит о низкой согласованности в опре-

Что по вашему мнению может считаться цифровым двойником?

9 ответов

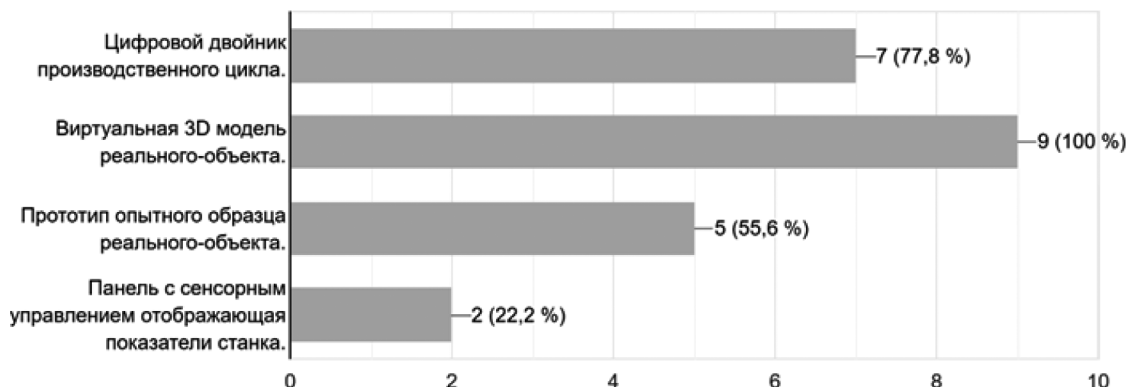


Рис. 1. Вопросы субъективного восприятия термина (вопрос 1)

Что по вашему мнению может считаться цифровым двойником?

9 ответов

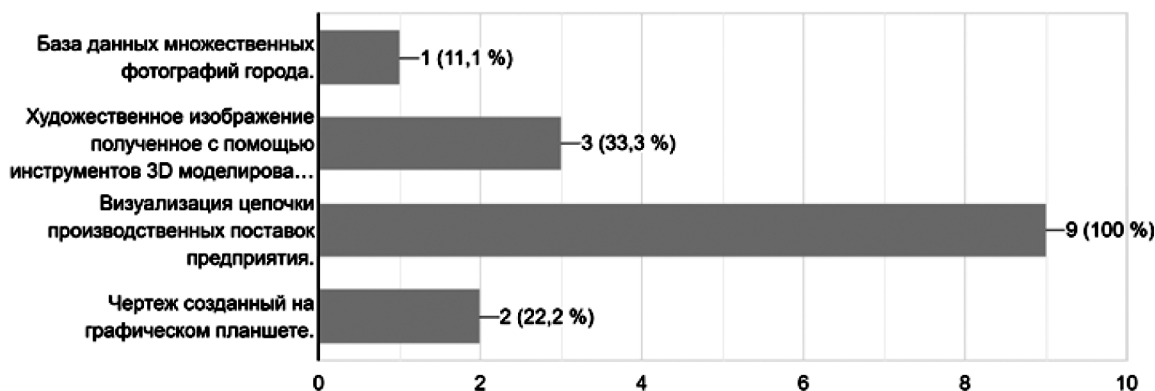


Рис. 2. Вопросы субъективного восприятия термина (вопрос 3)

Согласны ли вы с данными с утверждениями о видах термина "Цифровой двойник"

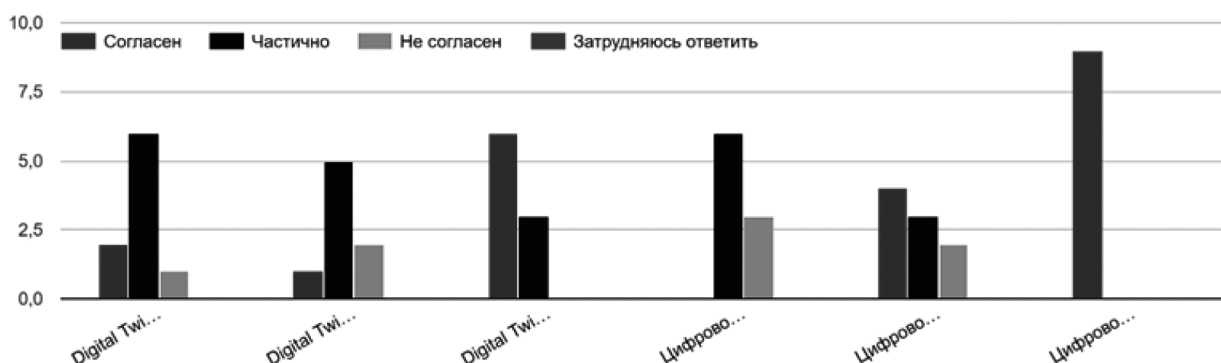


Рис. 3. Распределение голосов о вариантах делении термина

делении термина. В частности, изображение, полученное с помощью инструментов 3D моделирования, получило только треть голосов, против изначальных всех в первом вопросе. Данную особенность интересна тем, что итогом использования 3D-инструментов чаще всего является 3D модель объекта, таким образом можно

сделать предположение: «Не всегда объект, полученный с помощью инструментов создания двойников, будет являться двойником».

Последний вопрос, в котором есть согласие в ответах экспертов является вопрос о классификации и опреде-

лении термина ЦД экспертов (рис. 3). Основой данного вопроса являются классические виды двойников, представленные в открытых источниках. Были использованы 3 определения данных на английском языке и 3 определение аналогичные первым на русском языке. «Цифровой двойник изделия — позволяет производить множественные тестирования и испытания, на перенесенных в цифровую среду объектах.» — эксперты полностью согласились с данным утверждением.

Утвердительный ответ свидетельствует об их общем представлении о цифровом двойнике, как некоем виртуальном объекте, способном заменить реальное тестирование. Данный аспект большее всего соответствует второму критерию двойника: «должен вести себя реалистично при проведении тестирования». Схожесть ответов экспертов разных профессий свидетельствует, об общей цели двойников, не зависимо от области применения.

Одновременно с изложенным выше, отличия в оценках остальных видов отражает различия в представлении и вкладываемом смысле. Это может свидетельствовать о различии исходных позиций экспертов, на основании которых формируется соответствие термину «цифровой двойник», разноплановыми в областях применения двойников.

Основываясь на проведенном тестировании, можно заключить, что эксперты существенно расходятся в своих мнениях по предложенным вопросам, что свидетельствует о неоднозначном представлении термина в современном его употреблении. Одновременно с этим, существует общность представлений, не смотря на разные области профессиональной деятельности экспертов, что позволяет им без затруднений понимать друг друга и представляемые сущности в определенные моменты.

Заключение

На основании проведенного исследования, можно говорить о необходимости уточнения, доработки последующей адаптации к современной сфере компьютерной графики и дальнейшего развития термина «цифровой двойник». Проведенное экспертное тестирование позволяет сделать дополнительные выводы, что на данный момент, с позиции терминологии представление о цифровых двойниках вызывает затруднения у специалистов по информационным технологиям. По предположению переработка или уточнение термина позволит улучшить междисциплинарное взаимодействие в различных сферах и на разных уровнях человеческого взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. van Houten H. The rise of the digital twin: how healthcare can benefit—Philips //URL: <https://www.philips.com/aw/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html>. — 2020.
2. CeArley D. et al. Top 10 strategic technology trends for 2018 //The Top. — 2016. — Т. 10. — С. 1–246.
3. Forni A.A. Gartner identifies the top 10 strategic technology trends for 2017 //URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2016-10-18-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2017>. — 2016.
4. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. — IFAC PapersOnLine, 2015, Pages 567–57
5. F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A.Y.C. Nee, «Digital Twin in Industry: State-of-the-Art», in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, April 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
6. Ivanov D. et al. Digital supply chain twins: Managing the ripple effect, resilience, and disruption risks by data-driven optimization, simulation, and visibility // Handbook of ripple effects in the supply chain. — 2019. — С. 309–332.
7. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication //White paper. — 2014. — Т. 1. — №. 2014. — С. 1–7.
8. Jacobson P. I. Compositional semantics: An introduction to the syntax/semantics interface. — Oxford Textbooks in Linguistic, 2014.
9. Hall D. G. Continuity and the persistence of objects: When the whole is greater than the sum of the parts //Cognitive Psychology. — 1998. — Т. 37. — №. 1. — С. 28–59.
10. Rips L.J. Split identity: Intransitive judgments of the identity of objects //Cognition. — 2011. — Т. 119. — №. 3. — С. 356–373.
11. Тюзик В. Т. Инженерная и компьютерная графика. — БХВ-Петербург, 2013.
12. Sharma A. et al. Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions //Journal of Industrial Information Integration. — 2022. — С. 100383.
13. Карпов В.Э., Готовцев П.М., Ройзензон Г.В. К вопросу об этике и системах искусственного интеллекта //Философия и общество. — 2018. — №. 2(87). — С. 84–105.
14. Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем //Управление большими системами: сборник трудов. — 2017. — №. 66. — С. 94–157.
15. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Часть 2. Экспертные оценки. — 2011.
16. Тесленко В.И. Методика анализа и оценка результатов тестирования //Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. — 2006. — №. 1. — С. 78–95.
17. Kwastek K. Aesthetics of interaction in digital art. — Mit Press, 2013.
18. Qiu C. et al. Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review //Virtual Reality & Intelligent Hardware. — 2019. — Т. 1. — №. 6. — С. 597–610.
19. Калита В.В., Гайдай А.С. Профессиональная направленность и тип описания как детерминанты эффекта Барнума //Вестник Кемеровского государственного университета. — 2013. — Т. 1. — №. 4 (56). — С. 113–117.