



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.233.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-56-66>

ИМИТАЦИЯ КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

© А.В. Петров¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ исследования является оценка роли и значения имитационных моделей в построении и эксплуатации цифровых двойников. **МЕТОДЫ.** Основными методами исследования являются системный анализ и методология, методика и методы построения имитационных моделей. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проанализированы технологии создания и использования цифровых двойников и показано, что основой для их существования являются имитационные модели. Применяемые при этом информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором. Эффективность создания, использования и развития технологии цифровых двойников и теней обуславливается качеством построенной имитационной модели. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Для повышения качества имитационного ядра цифрового двойника сформулирован перечень задач, требующих решения. К их числу относятся автоматизация статистического анализа временных рядов, завершающаяся интуитивно понятным объяснением результатов анализа и генерацией наборов случайных чисел с определенными вероятностными свойствами; разработка методов оценки качества выбираемого инструментария имитационного моделирования; создание методик оценки качества трансформации ядра цифрового двойника в процессе ее модернизации по результатам натурной эксплуатации и формирование методик, методов, алгоритмического и программного обеспечения; создание цифровых двойников слабо формализованных систем.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая тень, синтез имитационных моделей, программные продукты, параметры сравнения, универсальность, предметная область.

Информация о статье. Дата поступления 22 августа 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

Формат цитирования. Петров А.В. Имитационное моделирование как основа технологии цифровых двойников // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66

SIMULATION AS THE BASIS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

A.V. Petrov

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is evaluation of the role and significance of simulation models in digital twin construction and operation. **METHODS.** The main research methods are system analysis and methodology, techniques and construction methods of simulation models. **RESULTS.** Having analyzed the technologies for digital twin creation and use, the author shows that simulation models form the basis for their existence. The information technology used in this case is a tool providing digital twin operation but it is not a determining factor. The quality of the constructed simulation model determines the efficiency of digital twin technology creation, use and development. **CONCLUSION.** To improve the quality of a digital twin simulation core a list of problems that need to be solved is formulated. They include automation of statistical analysis of time series, which is completed with an intuitive explanation of analysis results and generation of the sets of random numbers with certain probabilistic properties; development of quality assessment methods of the selected tools of simulation modeling; creation of quality assessment methods for digital twin core transformation in the process of

¹Петров Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем, e-mail: petrov@istu.edu

Alexander V. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automated Systems Institute of Cybernetics, e-mail: petrov@istu.edu



its modernization based on the results of field operation and formation of methodology, methods, algorithmic tools and software; creation of digital twins of poorly formalized systems.

Keywords: *digital twin, digital footprint (digital shadow), synthesis of simulation models, software products, comparison parameters, universality, subject area*

Information about the article. Received August 22, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

For citation. Petrov A.V. Simulation as the basis of digital twin technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66. (In Russian).

Введение

Моделирование как метод научного поиска и способ исследования известен достаточно давно и представляет собой замену реально исследуемой системы неким аналогом. Этот аналог повторяет именно те свойства исследуемого объекта, которые интересуют пользователя. Существует много классификаций модели и видов моделирования [1, 2]. Представленная ниже классификация может считаться приемлемой как с исторической точки зрения, так и с точки зрения наличия наиболее значимых приложений. Во-первых, это исторически первое возникшее логическое моделирование. Логическое моделирование представляет собой некую совокупность умозаключений, воспроизведенных мозгом человека, хранящимся в этом мозге и представляющим некий взгляд человека на ту или иную, систему ценностей, систему описаний. Она физически неосознаема и ее нельзя ощутить – это логика. Таких логических моделей достаточно много существует и, наверное, не будет преувеличением назвать все общественно-политические науки примерами логических моделей. Вторым, рядом стоящим по времени возникновения, методом моделирования является физическое моделирование, которое строится как инструментальный, подобно повторяющий физические свойства исследуемого объекта. Классический пример физической модели – детская игрушка. В современном мире физические модели занимают очень важное место. Они наиболее ярко отражены в так называемых тренажерных комплексах, когда человек, работающий на этом тренажере, подвержен

воздействию звука, вибраций, световых, визуальных и других эффектов. Это позволяет ему более качественно погрузиться в среду, для работы в которой он себя тренирует. Классический пример физической модели – это пластилиновая модель автомобиля в натуральную величину. Такой способ дизайнеры применяют до сих пор [3, 4]. Только построив пластилиновую модель автомобиля со всеми изгибами и формами, можно зрительно оценить, насколько это эстетично, красиво, приемлемо, воспринимаемо и т.д. А также нарисовать на компьютере любой автомобиль, вращать его, раскрашивать, смотреть под разным углом, издали или вблизи, но это – компьютер, экран, и он не дает такого качества визуального восприятия как взгляд человека на натуральный объект.

Третьим видом модели, который появился чуть позже логической и физической, является математическая модель. Считается, что это самый мощный вид моделирования. Математика, стремясь создать и развить способы формального описания всего и вся, конечно, является мощным инструментом исследования, развития и восприятия тех или иных явлений, объяснения различных взаимосвязей. При этом стоит помнить, что математики действуют в иммигрированном, корпоративном мире аксиом, правил, теорем, приемов и инструментов. Исторически математическое моделирование появилось с углубленным развитием математики. Особенно это, считаем, связано с появлением дифференциального исчисления и попыток с помощью математики



ческих формул описать те или иные физические явления в механике, в оптике, в целом, – в физике.

В наше время математические модели доказали свою эффективность и, конечно, являются мощнейшим инструментом науки. Но у него есть один очень крупный недостаток. Человечество стало создавать и использовать такие сложные объекты, настолько сложные по количеству элементов и взаимосвязей, методов функционирования, алгоритмов управления, потребностей в визуализации результатов, что математика не смогла предложить нам формализованное описание столь сложных систем, различных явлений, которые можно было применить, допустим, для адекватного и полного описания технологического процесса обогащения полезных ископаемых, для описания функционирования биологического объекта, общества и т.д. В данное время они отсутствуют. Математика может предложить только способы описания част-

ных явлений. Примеров этому много, и есть чем гордиться, но еще раз следует повторить, что окружающий нас мир настолько изменился с приходом новых технологических подходов, вычислительной техники и других инструментариев, что математика, к сожалению, пока не является таким универсальным способом представления. Она может описать некоторые элементы. Но эти элементы, отдельно описанные математикой, не составляют единое целое. Надо научиться как-то соединять разнородные математические аппараты. Допустим, возьмем дифференциальные уравнения и теорию случайных процессов, нужно суметь объединить вместе результаты расчетов, проведенных посредством различных математических инструментов. Эти проблемы и породили относительно новый вид моделирования, который вызван был именно необходимостью решения таких сложных задач. Этот метод получил название компьютерного или имитационного моделирования.

Имитационное моделирование

Обратимся теперь к определению имитационного моделирования, возникшему в середине прошлого века, и рассмотрим его достоинства и недостатки.

В литературе [5] имитационное моделирование чаще всего определяют как численный метод исследования сложных систем, элементы которых описаны разнородным математическим аппаратом и объединены некой связующей моделью, которую иногда называют информационной. Сейчас, в силу терминологических особенностей, имитационную модель почему-то стали называть цифровой. Это недопустимо, потому что работаем на цифровой вычислительной технике, и все что она делает – цифровое. И ни цифра, ни понятие «цифровой» связывают отдельные элементы имитируемой системы, описанные разнородным математическим аппаратом. Объединение производится именно на информационном уровне, передаются данные. Цифра – лишь технический носитель информации и не более.

Имитационное моделирование является довольно дорогостоящим способом исследований в силу его уникальности. Каждая имитационная модель – штучный продукт, который потом может тиражироваться и развиваться. Кроме того, на стоимость разработки значительно влияет природа объекта исследования, крайне сложная в описании и понимании. Но главный недостаток имитационного моделирования состоит в том, что это численный метод, а, как известно, численные методы дают частные решения, которые необходимо воспринять как частный результат, и требуется провести серию численных экспериментов, результаты которых нужно усреднить и обобщить. Затем необходимо правильно объяснить результаты. Преимущество в такой объемной и сложной работе с имитационной моделью состоит в том, что другого не дано – имитируются сложные системы, не описываемые в полном объеме математически.



Достоинства имитационного моделирования отмечены в литературе [5]. Во-первых, это великолепный способ обучения. Выше уже упоминались тренажеры как типичные примеры соединения физической математической, физической и логической моделей, которые позволяют обучать персонал – авиационный и водительский состав, капитанов-судоводителей, космонавтов и так далее. Причина этой возможности в том, что в имитационной модели мы можем вводить разные ситуации в виде наборов исходных данных. И, следовательно, можем предлагать пользователю выработать некие ответные реакции на эти ситуации, которые им предлагает имитационная модель. Следующее достоинство состоит в том, что можно так формировать исходные данные, что они в реальной природе не могут существовать. То есть задать такие исходные данные, которые показывают, как исследуемая система работает в аварийном режиме или в том режиме, которого вообще реально не существует. И третье важное преимущество, которое в литературе практически не встречается. Это возможность постоянной настройки имитационной модели по результатам экспериментов. Так устроен человек, что, проводя исследование, он все глубже и глубже погружается в проблему, пытаясь понять объект изучения и поставить полученные знания себе на службу. Подходы непрерывно модернизируются, трансформируются. Имитационная модель создается и потом используется, подвергаясь при этом изменениям. Иными словами, происходит адаптация к окружающей обстановке, к полученным результатам, модернизации взглядов исследователей. Поэтому эта адаптивная способность имитационных моделей является тоже весьма и весьма важным преимуществом имитационного моделирования.

Имитационное моделирование обладает достаточно развитой системой инструментария, который позволяет строить сами модели, визуализировать и обрабатывать результаты, воспроизводить входные данные. Имеются программные инструменты для построения имитационных моделей.

При этом каждый из этих инструментов в существенной степени влияет на эффективность имитационного моделирования. К примеру, воспроизведение исходных данных. Крайне затруднительно и не эффективно экономически собирать исходные данные с реального объекта. И здесь приходят на помощь методы, алгоритмы и программные средства, позволяющие воспроизводить входные воздействия. При этом входные воздействия носят случайный характер и корректное воспроизведение вероятностной природы входных воздействий прямо влияет на адекватность имитационной модели, на качество понимания исследователя о том, как работает и как устроена система, которую он изучает. Методы генерирования входных воздействий достаточно подробно описаны в литературе [6–8]. К сожалению, пользователи или создатели имитационных моделей мало обращают внимание на правильность, с точки зрения математической статистики, представления вероятностных свойств. Необходимо сначала изучить, понять, описать эти свойства и под них подобрать соответствующие методы генерирования исходных случайных чисел или входных воздействий, а потом только использовать эти данные в имитационных экспериментах. Здесь пользователи зачастую идут по упрощенной схеме. Они говорят, что все исходные процессы имеют нормальный закон распределения и являются некоррелированными процессами. И это никак не доказывается и не объясняется. Есть несколько десятков законов распределения вероятностей, описывающих ряды наблюдений. Кроме того, имитационное моделирование – это метод исследования систем в динамике, во времени, а, следовательно, и входные воздействия должны каким-то образом быть связаны, содержать зависимость одного значения от другого. И на это исследователи тоже мало обращают внимание. Это крупный недостаток, связанный, скорее всего, с отсутствием должного уровня понимания вероятностной природы окружающего нас мира и ее влияния на качество построения имитационной модели.



Важными для интерпретации результатов имитации являются способы их статистической обработки и визуализации. Статистическая обработка – это формализованный инструментарий, который реализуется в различных статистических пакетах, позволяющих провести дисперсионный анализ и регрессионный анализ и сделать выводы. Визуализация же результатов в значительной степени обеспечивает правильность толкования этих результатов.

Существует дилемма между тем какие программные средства использовать для имитационного моделирования. Существует две категории. Первая категория – это универсальные программные средства, которых сейчас достаточно много. Это AnyLogic, GPSS и др. [9]. Но недостаток этих программных средств состоит в их универсальности и для того, чтобы их использовать, нужен специалист, т.е. человек, специально обученный и обладающий компетенциями в использовании этого программного продукта. Он может быть неспециалистом в моделируемой предметной области, но он обязан быть специалистом и разбираться в этом программном средстве. Дополнительный специалист – дополнительные расходы и не только финансовые. Обучать профильного специалиста, допустим, технолога того

или иного производства, владению универсальными программными средствами вряд ли рационально. Он не освоит универсальные программные средства на нужную глубину, так как для этого требуется специальное образование, не сумеет использовать все возможности.

Другая категория – уникальное программное средство, специально разработанное и созданное для имитации конкретного, допустим, технологического процесса или для конкретного изучения поведения конкретного аппарата или машины. Создание таких программных средств, конечно, дорого. Но и универсальное программное средство тоже не дешево. Уникальная разработка имеет одно очень весомое достоинство – эта уникальная разработка ориентирована на конкретную предметную область, и обучить технолога ее использованию гораздо проще, нежели владению универсальным программным продуктом. Но есть один недостаток. Такое специализированное программное средство необходимо поддерживать и эта поддержка потребует материальных затрат. Они являются дополнительными затратами, но с точки зрения применения уникальные программные средства имитационного моделирования более эффективны.

Информационные технологии и имитационное моделирование

Параллельно с развитием имитационного моделирования происходило бурное развитие информационных технологий. К этому понятию нужно относиться достаточно аккуратно потому, что информационная технология – это не наука, а *технология* хранения информации и оперирования с ней и применения в различных областях. Например, бурное развитие системы автоматизированного проектирования в строительстве, машиностроении или других промышленных отраслях и так далее.

Вычислительная техника, естественно, тоже не стояла на месте. Производительность компьютеров как вычислительных аппаратов стремительно росла. Графическое отображение информации перешло

на качественно иной уровень. Мы сейчас даже не задумываемся о том, что наши смартфоны являются в значительной степени устройствами для графического отображения информации. Мы уже почти не используем персональные компьютеры в старом добром понимании системного блока и большого монитора. Мы работаем с ноутбуками и с планшетными компьютерами. Мы уже и на смартфонах имеем возможности работать как на персональном компьютере, конечно, не в том объеме, который нам предоставляет нормальный персональный компьютер в смысле вычислений и программирования.

Параллельно появилось очень много задач, требующих больших вычислений.



Примеров можно приводить много. Вот только один – метеорологические задачи, когда прогноз метеорологических условий требует значительных объемов вычислительных работ. Появились так называемые суперкомпьютеры, стала стремительно расти их мощность. Для университетов оказалось престижным владение суперкомпьютером. Есть задачи, нет задач – суперкомпьютер должен быть. И если задач такого уровня вычислительной сложности нет, то суперкомпьютер превращается в некий музейный экспонат. Но это дело организационно-административное.

Параллельно с миниатюризацией вычислительной техники и ростом возможностей планшетов, ноутбуков и смартфонов создано ответвление в сторону больших вычислительных машин с гигантскими вычислительными мощностями и с гигантскими возможностями хранения информации. На базе этого появились центры обработки данных. Это серьезные технологические достижения, потому что они аккумулируют самые последние разработки в сфере вычислительной техники, в сфере хранения и использования информации, не говоря о таких обеспечивающих вещах, как системы кондиционирования или системы безопасности электроснабжения. Информация все больше становится материально востребованной. Существует расхожая фраза «кто владеет информацией – владеет миром», но это факт. Поэтому проблемам информационной безопасности стало уделяться все больше и больше внимания.

В 2003 г. профессор Технологического института штата Флорида Майкл Гривс, являясь помощником директора «Центра управления жизненным циклом и инновациями», написал статью «Цифровые близнецы и превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» [10–12]. Автор выдвинул очевидный постулат, состоящий в том, что применение цифрового двойника происходит на протяжении всего жизненного цикла изделия с целью обеспечения его высокого уровня качества для потребителей. Сам Майкл Гривс признает, что термин «Цифровой двойник» и

производные от него придумал некий инженер, который работал в НАСА. Профессор Гривс сумел обобщить все технические и программные достижения, а также достижения информационных технологий, уровень производственных и непроизводственных технологий идеей цифрового двойника – цифрового представления объекта, которое служит полным его описанием. Конечно, объекты бывают разные и поэтому информация о нем должна храниться с определенной защитой. Отсюда возникает необходимость использования имеющихся наработок в сфере информационной безопасности. В качестве примера можно привести *blockchain*, не говоря уж о традиционном шифровании.

Большие возможности по хранению информации проявили и другую сторону цифровых двойников, по которому очень успешно идут многие крупные фирмы (Boeing, Airbus, Siemens, Dassault и другие). Имеется некая машина и есть ее цифровой описание в виде цифрового представления чертежей, значений параметров, документации и тому подобное. Тогда такое описание дает полное представление о том, как функционирует эта машина, и можно накапливать персонифицированную для каждой машины информацию о ее функционировании и условиях, в которых она функционирует. По мере накопления информации можно прогнозировать на основе базовой цифровой модели (имитационной модели) направления модернизации как конкретной машины, так и всей конструкции в целом, и оценивать последствия этой модернизации.

Следует обратить внимание на ту фразу, которую в своей публикации приводит Майкл Гривс: «Меня не беспокоит структура данных. У нас есть необходимые инструменты, чтобы решать все подобные проблемы». Здесь речь идет о том, что профессор Гривс понимает, что информационные технологии, BigData, *blockchain* – это просто инструмент. Это просто карандаш, просто напильник, которой необходимо использовать с наибольшей пользой. И вот этот карандаш, этот инструмент достиг такого состояния, что он подвинул пользова-



теля его применять. Это и вызвало появление понятия «цифрового двойника». Можно создавать имитационные модели, их пропагандировать, создавать программные средства, автоматизирующие процесс построения имитационных моделей, т.е. развивать это сторону моделирования. Но инструмент, который потом предложила жизнь, состоит в том, что он обеспечил эффективную во всех отношениях (включая безопасность) возможность оперирования с огромными объемами данных. Распределенные вычисления, blockchain, технические и программные возможности Интернета, телекоммуникации подталкивают создателей и пользователей имитационных моделей на другой уровень, они вытолкнули их на другой уровень, заставили их перейти на обобщение результатов на принципиально новом уровне. Колоссально, что Майкл Гривс это заметил в 2003 г. Данная публикация пятнадцатилетней давности с течением времени породила как бы новое движение. Но, хотя на самом деле, ничего принципиально нового нет. Это просто инструментарий, использование информационных технологий, с одной стороны, и, с другой стороны – это просто имитационное моделирование в таком элементарном исполнении. Соединенные вместе они дают новый эффект. А то, что эффект проявляется больше всего там, где есть развитые математические теории, на базе которых строятся качественные имитационные модели (не те, которые носят интуитивный характер, то есть отражают взгляд создатели этой модели на понимание моделируемой системы). Формальные методики позволяют создать для самолета цифровую модель и с течением времени размножить ее в форме цифровых теней. Но имитационная модель как таковая, по сути, ничем не изменилась. Это (как есть) численный эксперимент с математическими моделями элементов сложной системы, объединенными информационной моделью, так и осталось. Если смотреть на развитие понятия и применения цифровых двойников, то это традиционный для науки процесс. Так было с кибернетикой и с генетикой. Вначале бум, большие ожидания, затем происходит спад, потому что

возникает потребность в практической реализации. И затем начинается планомерная наработка группами энтузиастов каких-то результатов. Наконец, после этого спада наступает планомерное развитие. Такой путь прошла кибернетика. На нашей памяти старые книги, в которых написано было, что все будет автоматизировано, человек будет только пожирать результаты этого бурного ожидаемого роста новой науки. Это начало 50–60-х гг. XX в. Но этого сразу не произошло. Потребовалось время. Также и с цифровыми двойниками и цифровыми технологиями. Полтора десятка лет назад появилась идея, затем она как бы замерла.

С развитием информационных технологий она получила свое продолжение. Поэтому выводы, которые можно сделать, состоят в следующем. Во-первых, необходимо решить большой комплекс задач, связанных с развитием имитационного моделирования как такового. Во-вторых, предстоит решать крайне серьезную и исключительно важную задачу построения цифровых двойников слабо формализованных систем и объектов. В-третьих, это разработка инструментария, обеспечивающего количественную оценку эффективности проводимых действий. И, наконец, в-пятых, необходимо отойти или пережить рекламные моменты, когда выступают пропагандисты, а порой и не пропагандисты, особенно в интернете. Они рассказывают всем как это прекрасно – цифровой двойник, цифровые тени. Как все это потом будет, но при этом они, сколько удалось посмотреть, не дают каких-то времен оценок и не показывают, пусть не в деталях, собственные достижения. Очевидно, есть отрасли, допустим, военного назначения, где это уже есть и происходит. Но для массового человека этого пока нет. Когда объявляют лозунги о цифровой экономике и говорят, что мы все переходим на цифру, то за этим следует понимать, что, прежде чем это сделаем, необходимо проделать очень большую работу фундаментального, практического и агитационного вида для того, чтобы это стало действительно результатом, реально вошло в нашу жизнь.



И еще один момент, как бы предостережение: нужно очень аккуратно и взвешенно относиться к тем словам, которые произносят популяризаторы идеи цифрового двойника и цифровой тени. Во-первых, они практически подробно не говорят о том, что реально делают, опасаться тех цифровых проповедников, которые говорят о том, что могут все. Сейчас поговорим с тем или иным руководителем, министром, представителем администрации или корпорациями. В результате обеспечат нам финансовую поддержку, и тогда выдадим фантастический результат. Помним показанные по телевидению российские смартфоны. А, если не будет

этих денег, то жизнь остановится и идея цифровых технологий в промышленности, индустрия 4.0 остановится? Особое внимание необходимо обращать на практические результаты, достигнутые в этой сфере, пропагандировать эти практические результаты, не проекты, а практически достигнутые результаты. А чтобы их было как можно больше, нужно развивать все: науку фундаментальную и прикладную, образование – готовить специалистов в этой сфере, и СМИ, чтобы они давали правдивую информацию, доводили ее в понятной форме до населения, и цифровая экономика вошла в нашу жизнь приемлемым путем.

Основы технологии цифровых двойников

Майкл Гривс формулирует три требования к цифровым двойникам [10]. Первое требование состоит в необходимости визуального повторения облика исходного объекта. Это важное требование, но не критичное. Второе требование оговаривает необходимость объекту вести себя реалистично при проведении различных испытаний. И третье требование заключается в возможности получения информации, сформированной с помощью искусственного интеллекта, с оценкой текущего состояния объекта.

Обратим внимание читателя на два последних пункта. Это не что иное, как традиционное применение имитационной модели для решения реальных задач и не более того. Но возможности хранения информации, ее обработки и информационной защиты наводят на мысль профессора Гривса и его последователей на то, что можно за каждым выпускаемым экземпляром машины, агрегата, самолета, танка, человека закрепить его цифровое описание. Это описание будет с ним следовать по мере его жизненного цикла и храниться в цифровой среде. В него будут вноситься изменения по результатам эксплуатации и так далее. Все это носит название цифровой двойник в форме копии (цифровой тени) и это используется в рамках терминологии «Индустрия 4.0».

Таким образом, в основе любых циф-

ровых двойников лежит цифровая (суть имитационная) модель. Профессор А.И. Боровков, недавно выступая на одном из молодежных форумов [13, 14], говорил о том, что это цифровая модель строится на базе математических формализованных методов теорий упругости, надежности, прочности и так далее. Затем это цифровое описание следует за экземпляром изделия, снимаются его эксплуатационные характеристики и на этой цифровой модели проверяется, как работает экземпляр и как можно улучшить другие экземпляры. Но это не что иное, как имитационное моделирование по реальным данным. Профессор А.И. Боровков говорит и о том, что можно заведомо формировать так исходные данные, что они описывают некую аварийную ситуацию. А это опять же имитационное моделирование. На основании этого можно сделать вывод о том, что, если мы говорим о цифровых двойниках, цифровых тенях, цифровых технологиях, то следует понимать, что должна быть некая методология, сопровождаемая методиками, методами, инструментарием, включая программно-технические. Все это позволяет, во-первых, создать ядро цифрового двойника, то есть ту самую базовую имитационную модель, и, во-вторых, должна быть технология, обеспечивающая сбор информации о поведении двойников или цифровых теней и использовании ее для модерни-



зации базовой имитационной модели, то есть для модернизации выпускаемой продукции на базе опыта эксплуатации предыдущих вариантов или предыдущих экземпляров. Отсюда ясно, что если мы отойдем от новомодной цифровой терминологии, то в основе этих самых современных пропагандируемых и порой спекулятивных достижений, лежит элементарное имитационное модели-

рование. Та самая имитация, которая родилась в середине прошлого века и которая требует развития средств воспроизведения исходных данных, средств обработки результатов средств визуализации, средств автоматизированного построения имитационных моделей и всего того, что связано с классическим понятием компьютерного, цифрового – имитационного моделирования.

Направления развития имитационного моделирования как базы цифровых двойников

При разработке имитационных моделей необходимо решать несколько параллельных задачи для того, чтобы повысить эффективность применения этого метода исследования.

Первая задача состоит в том, что необходима разработка таких методов, методик, программных продуктов и алгоритмов, которые бы максимально просто, но теоретически корректно обеспечивали быструю обработку рядов наблюдений и выдавали бы в качестве результата готовые ряды наблюдения заданного объема, обладающие автоматически выявленными вероятностными свойствами. Это как раз и есть те данные, которые снимаются с реального объекта и которые, как предполагается в рамках цифровых двойников, и будут использоваться для того, чтобы потом проводить виртуальное моделирование на реальных объектах. Это довольно сложная задача. Существуют программные продукты, проводящие статистический анализ достаточно эффективно, и математическая статистика дает хорошую базу для этого. Но они ориентированы, тем не менее, на продвинутого пользователя, на человека, знающего статистику и способного верно интерпретировать и трактовать результаты, выдаваемые пакетом. Иными словами, возникает задача создания условия непрофессиональному пользователю: корректно интерпретировать результаты статистической обработки. То есть цель состоит в том, чтобы разработать такие способы статистической обработки реальных рядов наблюдений, которые бы (1) предоставляли неспециалисту

понимать и трактовать результаты и (2) они должны давать возможность специалисту в предметной области получать случайные числа с оцененными вероятностными свойствами в неограниченном объеме. Это требует разработки специально подготовленных для такой работы методов генерирования случайных чисел с заданными вероятностными характеристиками. Эта задача существенно усложняется, если речь идет об объектах очень сложной вероятностной природы – многомерных случайных процессов или случайных полей.

Вторая задача состоит в необходимости разработать эффективные оценки выгоды индивидуальной разработки имитационной модели или применения универсальных программных средств построения имитационных моделей. Должна существовать некая формализованная методика принятия решения для того, чтобы можно было иметь четкую стратегию выбора способа построения имитационной модели. Исследователь должен иметь оценку о том, сколько это будет стоить не только в виде финансовых показателей, но и во временных или иных (ресурсных) параметрах.

Третья и исключительно важная задача связана с возможностями теоретического обоснования математических моделей. Речь идет о том, наиболее распространенными и, соответственно, эффективными являются цифровые двойники в тех областях, в которых имеются добротные математические описания в терминах, допустим, теории пластичности, теории упругости, сопротивления материалов или еще чего-то. То есть, такие добротные математически



обоснованные, проверенные на практике теории, которые обеспечивают построение адекватных математических моделей тех или иных процессов, протекающих в создаваемом или созданном аппарате, машине или изделии. В качестве примера используем самолет. Для этого объекта, несмотря на то, что подавляющее большинство вопросов можно решить чисто математически, тем не менее, затем начинается испытание этого самолета. Вносятся корректировки. Поэтому возникает задача построения или оценки применимости и качества выдаваемых результатов теми или иными математическими методами. Речь идет о формальных оценках и субъективных оценках.

Но что делать с теми машинами, агрегатами, технологическими процессами, в общем, системами, которые математические не формализованы. Возможны ли для таких систем цифровые двойники? Конечно, ответ здесь положительный. Вспомним наши смартфоны, которые «сами» формируют альбомы наших фотографий или показывают рекламу, «подсказанную» нашими поисковыми запросами. За каждым человеком, выходящим в интернет, следует его

цифровая тень. Но она же не формализована. Выше приведен только один пример. А есть другие примеры промышленного типа. Допустим технологии обогащения полезных ископаемых. В этой предметной области нет такой всеобъемлющей теории типа сопромата. Это трехфазная среда «жидкость-газ-твердое». Эти сложные физико-химические процессы, протекающие при обогащении, существенно усложнены еще и тем, что переработке подвергается минеральное сырье, которое имеет разные в одном том же месторождении физические свойства, влияющие на обогатительные процессы, на работу оборудования, а в ходе эксплуатации меняют свои параметры. Математических способов, описывающих эти процессы, можно сказать, не существует. Но, если обогатительные фабрики существуют, то и цифровые двойники и тени для них также обязаны существовать. Помимо обогащения и телекоммуникационных устройств наверняка можно найти такие примеры и такие области, в которых цифровые двойники должны быть.

Выводы

Таким образом, анализ технологии создания и использования цифровых двойников показывает, что основой для их существования являются имитационные модели. Применяемые при этом информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором. Эффективность создания, использования и развития технологии цифровых двойников и теней обуславливается качеством построенной имитационной модели. Для повышения качества имитационного ядра цифрового двойника необходимо решить серию задач, таких как:

1) автоматизация статистического анализа временных рядов, завершающаяся

интуитивно понятным объяснением результатов анализа и генерацией наборов случайных чисел с определенными вероятностными свойствами;

2) разработка методов оценки качества выбираемого инструментария имитационного моделирования;

3) создание методик оценки качества трансформации ядра цифрового двойника (имитационной модели) в процессе ее модернизации по результатам натурной эксплуатации;

4) формирование методик, методов, алгоритмического и программного обеспечения создания цифровых двойников слабо формализованных систем.

Библиографический список

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
2. ISO/IEC/IEEE 24765:2010 Systems and software engineering - Vocabulary/IEEE Std 1233-1998 (R2002)

IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications.

3. Создавать инновации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nissan.ru/experience->



nissan/trust/creators.html

4. Мои годы в General Motors [Электронный ресурс]. URL: <https://books.google.ru/books?isbn=5040994591>
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 418 с.
6. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.
7. Ермаков, С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. 2-е изд., доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1982. 296 с.
8. Петров А.В. Моделирование процессов и систем. СПб.: Лань, 2015, 288 с.
9. Боев В.Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World. Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 543 с.
10. Эра трансформеров: «цифровые близнецы» уже

- рядом [Электронный ресурс]. URL: <https://sciencepop.ru/era-transformerov-tsifrovye-bliznetsy-uzhe-ryadom/> (12.06.2018)
11. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/news/6721> (12.06.2018)
12. Что такое цифровой двойник и для чего он нужен? [Электронный ресурс]. URL: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (12.06.2018)
13. Новые парадигмы проектирования. Фабрики будущего, цифровые двойники [Электронный ресурс]. URL: <https://www.clipsoon.com/cbUkFx1WXfs/video.html> (12.06.2018)
14. Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И., Мельникова М.П., Михайлов А.А., Немов А.С., Пальмов В.А., Силина Е.Н.. Компьютерный инжиниринг. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 93 с.

References

1. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and modeling]. Moscow: Higher School Publ., 1976. 479 p. (In Russian)
2. ISO / IEC / IEEE 24765: 2010 Systems and software engineering – Vocabulary IEEE Std 1233-1998 (R2002) IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications.
3. *Create innovations* [To create innovation]. URL: <https://www.nissan.ru/experience-nissan/trust/creators.html> (In Russian)
4. *Moi gody years v General Motors* [My years at General Motors]. URL: <https://books.google.com/books?isbn=5040994591>
5. Shannon R. Simulation of systems - art and science, 1978, 418 p. (Russ. ed.: *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauka*. Moscow, Mir Publ., 1978, 418 p.)
6. Bykov V.V. *Tsifrovoye modelirovaniye v statisticheskoy radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow: Soviet radio Publ., 1971. 328 p. (In Russian)
7. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Statisticheskoye modelirovaniye: uchebnoye posobiye* [Statistical modeling: Learning aids]. Moscow: Science Publ., 1982. 296 p. (In Russian)
8. Petrov A.V. *Modelirovaniye processov i sistem* [Modeling of processes and systems]. Saint-Petersburg: Lan Publ., 2015, 288 p. (In Russian)

Критерии авторства

Петров А.В. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

9. Boev V.D. *Kontseptual'noye proyektirovaniye sistem v AnyLogic i GPSS World* [Conceptual design of systems in AnyLogic and GPSS World]. National Open University "INTUIT", 2016, 543 p.
10. *[Era transformerov: «tsifrovyye bliznetsy» uzhe ryadom* The era of transformers: "digital twins" is near]. Available at: <https://sciencepop.ru/era-transformerov-tsifrovye-bliznetsy-uzhe-ryadom/> (accessed 12 June 2018)
11. *Novaya paradigma tsifrovogo proyektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoy produktii novogo pokoleniya* [A new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of new generation]. Available at: <http://fea.ru/news/6721> (accessed 12 June 2018)
12. *Chto takoe cifrovoy dvoynik i dlya chego on nuzhen?* [What is a digital twin and what is it for?] Available at: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (accessed 12 June 2018)
13. *Novyye paradigmy proyektirovaniya. Fabriki budushchego, tsifrovyye dvoyniki* [New design paradigms. Factories of the future, digital twins]. Available at: <https://www.clipsoon.com/cbUkFx1WXfs/video.html> (accessed 12 June 2018)
14. Borovkov AI, Burdakov SF, Klyavin OI, Melnikova MP, Mikhailov AA, Nemov AS, Palmov VA, Silina E.N. *Komp'yuternyy inzhiniring* [Computer Engineering]. Saint-Petersburg: Polytechnic University Publ., 2012. 93 p. (In Russian)

Authorship criteria

Petrov A.V. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.