

УДК 519.876.5

СИНЕРГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов (Казань)

Введение

Имитационное моделирование (ИМ) широко известная, хорошо изученная и детально проработанная технология, которая в практически значимом аспекте появилась в 60-70-е годы прошлого столетия [1-3]. Она заслуженно и на постоянной основе вызывает постоянный практический интерес у пользователей. Особенностью ИМ, впрочем, как и многих важнейших технологий, является то, что ее огромный потенциал, безграничные возможности и преимущества, раскрывается постепенно – по мере увеличения мощности компьютерных вычислений, развития ИТ технологий и комплексного использования возможностей теоретических и программных инструментов на междисциплинарных стыках.

Основным сдерживающим фактором более широкого внедрения ИМ всегда являлись ограничение имеющихся вычислительных мощностей и текущий уровень развития цифровых технологий. Существовало огромное множество проработанных, но не реализованных на практике применений ИМ из-за недостаточности вычислительных мощностей. В частности, на каждом этапе развития технологии существует ограничение на моделирования очень сложных систем – по структуре, количеству элементов и связей, когда систему теоретически можно описать в виде модели на одном из языков ИМ, а вот отладить и верифицировать практически невозможно из-за множества нюансов и деталей. Хотя многие и пытались сделать это. Кроме того, ранее использование модели было практически невозможным в оперативном управлении – из-за длительности ее исполнения, существенно отстающего от ритма выработки управляющих решений в реальной системе. Постепенно, по мере развития науки и техники, эти методические и технические ограничения и барьеры снимаются.

В настоящее время ИМ проходит свой очередной цикл развития, расширения и углубления границ использования технологии. Этому связано с тем, что за последнее десятилетие произошло множество значимых событий:

- сделан очередной рывок в развитии технологии, мощности и организации вычислений (многократное повышение производительности процессоров, распределенные и облачные вычисления стали стандартом де-факто, появились первые квантовые компьютеры и т.д.);
- разработаны и широко внедрены на практике более эффективные алгоритмические, программные и информационные методологии и технологии (искусственный интеллект, большие данные, интернет вещей, WEB программирование и др.);
- произошло существенное научно-технологическое обновление самих программных инструментов моделирования, в основном за счет появления платформ ИМ, построения на основе модели цифровых двойников и комплексное использование в процессе их применения других информационных технологий (ГИС, анимации, нейронных сетей, виртуальной реальности, многофакторной оптимизации и др.).

В итоге, произошло очередное расширение роли ИМ в экономике. И не просто расширение возможностей моделирования более сложных систем на исследовательском уровне применения, но и появление практических возможностей интуитивного уровня

управления сложными системами (цифровыми двойниками), соответствующего ритму принятия управленческих решений на основе моделей (рис 1).



Рис. 1. Переход от управления на основе данных к интуитивному управлению

Этапы развития технологии имитационного моделирования

ИМ, как и любая технология, имеет абсолютно объективные циклы развития (созревания). На это уходят годы, и не каждая из них выживает, многие исчезают, так и не оправдав всех ожиданий от их применения. Технология ИМ одна из немногих, которая прошла проверку временем, рынком и множеством других испытаний. Поэтому можно уже анализировать, как она развивалась и через что ей вероятней всего предстоит еще пройти дальше. В 1995 году компания Gartner предложила кривую зрелости перспективных технологий [4]. С тех пор кривую Гартнера активно используют не только как инструмент оценки и анализа перспективных технологий и рынков, а и как объективное представление уже состоявшегося пути развития технологии, ее текущего состояния и ближайших перспектив. Именно в таком виде в данной статье представляется развитие ИМ.

За более чем 60 лет развития технологии, с момента «Триггера начала» в 60-е годы мы видим два характерных классических цикла развития и применения технологии ИМ, очевидцем и сопричастным к которым стал один из авторов статьи.

С начала 70-х годов наступил цикл «Больших ожиданий и разочарования» – непрерывный подъем. Выражался он наличием множества (более 500) языков, созданием гигантского количества моделей, по большей части исследовательских и учебных, с всеобщим обожанием и принятием (в прессе и у пользователей) и наличием огромных перспектив применения. В результате был достигнут пик развития в начале 80-х годов. А потом пошел резкий спад и снижение интереса, так как ожидания были существенно завышены, а эффект от применения в экономике недостаточен. К объективным причинам такого спада можно было бы отнести большой недостаток вычислительных мощностей в связи с переходом на персональные компьютеры, потеря интереса от мировых ИТ гигантов (например, IBM), неготовность профессионального сообщества ИМ к слишком резким технологическим и методическим вызовам.

90-е годы прошлого столетия ознаменовались началом цикла последовательного «Созревания». Сохранению ИМ способствовало наличие огромного потенциала, заложенного в технологию. Далее, как и для любой зрелой технологии начался постепенный, медленный, но все же подъем. Цикл «Созревания» в развитии ИМ и

постепенное расширение области применения метода стало возможным благодаря самоотверженной работе профессионалов.

Учитывая все это, на основе анализа исторических данных, собственного опыта и опыта своих коллег, в терминологии и форме, применяемой компанией Gartner, представим процесс развития ИМ в виде, показанном на рис. 2.

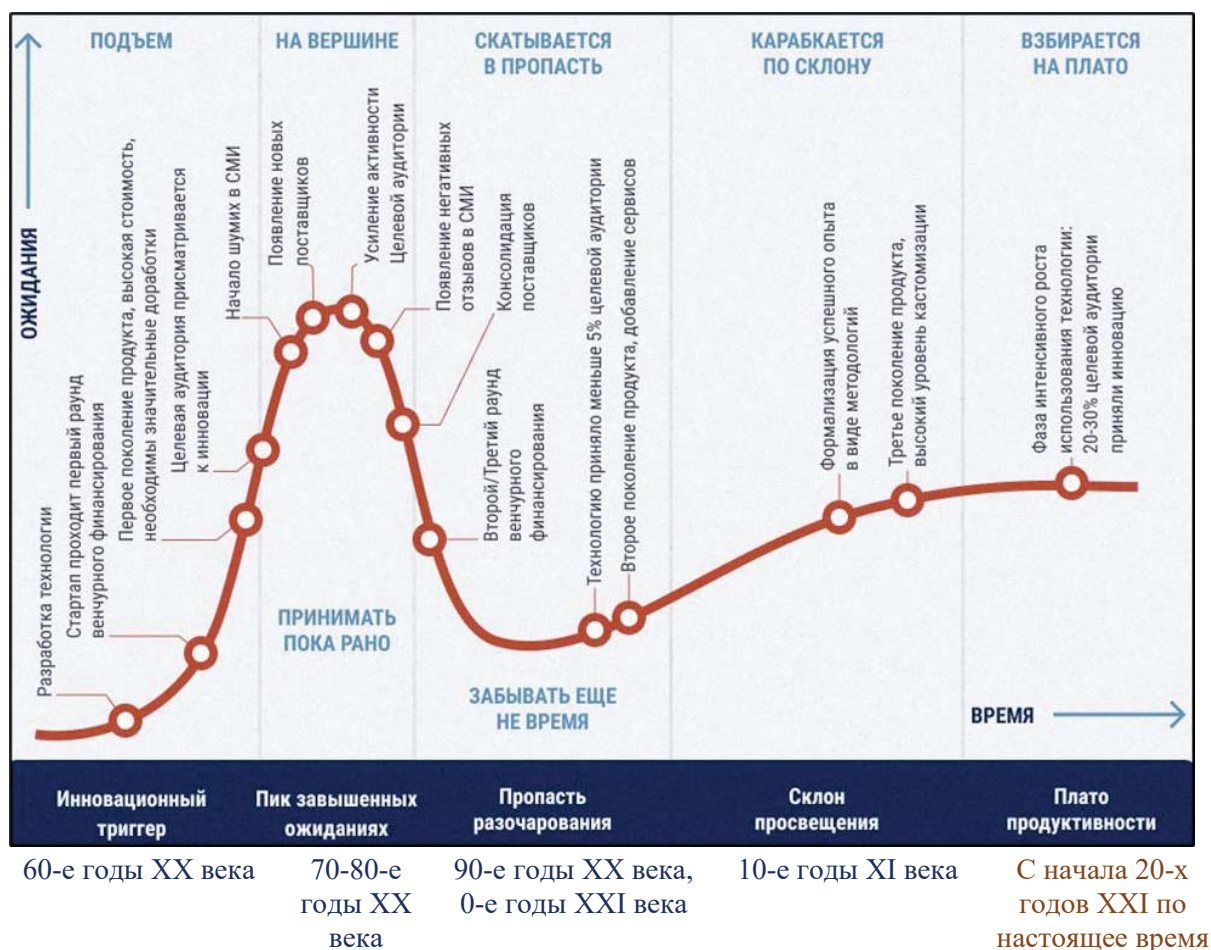


Рис. 2. Цикл развития технологии ИМ

Таким образом, в настоящее время технология ИМ «созрела» для широкого и эффективного применения в любой сфере экономики, как универсальный инструмент анализа, исследования и оптимизации сложных систем. Это показывает практика постоянно растущих применений технологии в мире и в России.

Перспективы развития и применения ИМ в России

Многими авторами, в том числе и нами, неоднократно проводился обзор состояния и развития ИМ в России [5, 6, 7]. Проведем уточненный анализ потенциала рынка ИМ в России на 2025 и последующие годы на основе наших предыдущих обзоров, статистических данных о количестве предприятий на 1 января 2025 года, размеров их выручки за 2024 год и имеющихся данных о текущем уровне применения ИМ.

Достаточно большое количество предприятий имеют одну или несколько сложных систем, требующих анализа, оценки и управления. Если до определенного уровня сложности можно обойтись без применения специальных программных средств системного анализа, то сейчас для большинства систем ручной анализ и волюнтаристическое управление уже просто физически невозможно. Необходимо использовать автоматизированные средства системного анализа. Одним из основных таких средств является ИМ. Будем называть такие системы – сложными системами.

Основной концепцией анализа является тот факт, что имеется множество сложных систем S , требующих имитационного исследования или управления. У каждой из них имеется свой собственник (юридическое лицо, предприятие), который заинтересован в эффективности ее работы. Причем, у собственника может быть не одна, а несколько систем, требующих изучения для повышения их эффективности. Таким образом, множество систем, требующих построение имитационной модели, можно представить в следующем виде (1).

$$S = \{S_1^1, \dots, S_i^j, \dots, S_n^m\} \text{ или } S = \sum_1^n \sum_1^m S_i^j \quad (1)$$

где, n – множество предприятий;

m – множество сложных систем на предприятии.

Действительно, основными потенциальными пользователями ИМ являются предприятия, которые и несут затраты за имитационные исследования. Согласно данным портала СПАРК агентства Интерфакс [8] в России на начало 2024 года работает свыше 3 миллионов 260 тысяч юридических лиц. Многим из этих предприятий может никогда не потребоваться ИМ, но достаточно большой группе предприятий оно просто необходимо.

Как определить, в каких случаях необходимо ИМ?

Вероятней всего тогда, когда предприятие является собственником крупной производственной, социальной, экономической или какой-то другой системы, и оно заинтересовано в том, чтобы эта система работала быстрее, производительнее и с меньшими экономическими издержками. На наш взгляд наличие сложной системы (или систем) на предприятии находится в прямой зависимости от его экономической мощи. Вполне объективным показателем такой мощи является выручка предприятия. Правительство России все предприятия по объему выручки делит: на микропредприятия (до 120 млн. руб.), малые предприятия (от 120 до 800 млн. руб.), средние предприятия (от 800 млн. руб. до 2 млрд. руб.) и крупные предприятия (свыше 2 млрд. руб.).

Отбросим из рассмотрения микропредприятия, так как использование ими ИМ маловероятно. Также не на каждом малом предприятии может быть сложная система, требующая разработки модели. Даже не на всех средних и крупных предприятиях требуется ИМ, поэтому, введем корректирующие коэффициенты $K_{s.m}$, $K_{s.cp}$ и $K_{s.kp}$. Их значение меньше 1, и они показывают долю предприятий данного типа, которым потенциально требуется ИМ.

В таблице 1 приведено количество предприятий в России, которым потенциально необходимо ИМ - с разделением по типам, без микропредприятий.

Таблица 1. Потенциальное число предприятий в России, которым необходимо ИМ

Тип предприятия	Оборот предприятия (млн. руб. в год)	Количество предприятий по portalу СПАРК	Количество предприятий, требующих ИМ
Малое	От 120 до 800	188290	$188290 * K_{s.m}$
Среднее	От 800 до 2 000	20917	$20917 * K_{s.cp}$
Крупное	Свыше 2 000	25737	$25737 * K_{s.kp}$

Стоимость имитационного исследования сложной системы $\Pi_{им}^s$ может быть разной, но опыт многолетних разработок говорит о том, что можно с высокой долей вероятности предположить, что $0,5 < \Pi_{им}^s < 3$ млн. руб. Будем считать, что для малого предприятия $\Pi_{им}^s = 0,5$ млн. руб., среднего – $\Pi_{им}^s = 1,5$ млн. руб., для крупного – $\Pi_{им}^s = 3$ млн. руб. Хотя возможны и другие, значительно более высокие цены, особенно в

проектах с крупными предприятиями. В результате, после уточнения потенциального количества систем и возможной стоимости их исследования, получаем формулу ценовой оценки рынка ИМ (2)

$$C_{им} = \sum_1^{n1} \sum_1^{m1} C_i^j * K_{с.м} + \sum_1^{n2} \sum_1^{m2} C_i^j * K_{с.ср} + \sum_1^{n3} \sum_1^{m3} C_i^j * K_{с.кр} \quad (2)$$

где:

$n1, n2, n3$ – множество предприятий, требующих ИМ, соответственно – малых, средних и крупных;

$m1, m2, m3$ – множество сложных систем на предприятии, соответственно – малых, средних и крупных.

Для более всесторонней оценки рынка ИМ и учитывая имеющиеся неопределенности в диапазоне корректирующих коэффициентов вероятности необходимости имитационного исследования системы $K_{с.м}$, $K_{с.ср}$ и $K_{с.кр}$ введем три сценария оценки – пессимистичный ($K_{с.м}=0,05$, $K_{с.ср}=0,1$ и $K_{с.кр}=0,1$), базовый ($K_{с.м}=0,1$, $K_{с.ср}=0,1$ и $K_{с.кр}=0,15$) и оптимистичный ($K_{с.м}=0,15$, $K_{с.ср}=0,15$ и $K_{с.кр}=0,2$).

Таким образом, в интегральном виде оценка потенциала рынка ИМ на данный момент может быть визуальна изображена в виде, показанном на рис. 3.

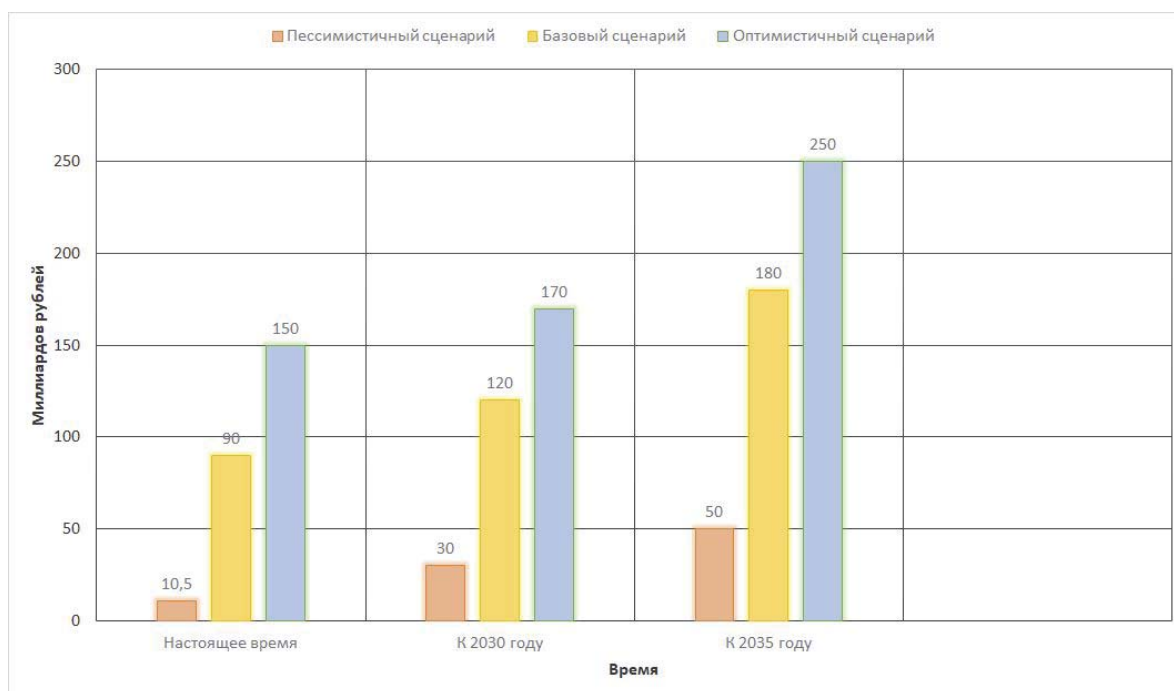


Рис. 3. Потенциал рынка ИМ в России 2025-2035

Хотя объем рынка ИМ в России, по сравнению с мировым [9], составляет всего 3-5%, развитие ИМ в России идет полным ходом и соответствует зависимости, приведенной на рис. 2. В настоящий момент мы находимся на плато продуктивного развития на переходе от широчайшего потенциала применения, к реальному массовому использованию. И для этого, всем нам, профессионалам, необходимо постоянно доносить до потенциальных пользователей, что такая технология есть, она эффективна и, если нужно, обучать ее использованию.

Платформы ИМ и основные тренды их развития

Любая технология, в том числе и ИМ, не может развиваться изолированно от окружающих ее и постоянно изменяющихся систем и технологий. При практическом решении множества прикладных задач идет не только последовательное развитие подходов и методов моделирования, но и постепенная интеграция ИМ с различными математическими методами, другими цифровыми технологиями, источниками и технологиями получения данных, автоматизированными системами предприятий и т.д., вплоть до обеспечения непосредственной связи с моделью в реальном времени.

В итоге, рынок моделирования постепенно идет к решению задач имитационного исследования и управления сложной системой на основе методологии максимально возможного комплексирования, в рамках единой программной технологии и более глубокого включения всех этапов исследования – от получения и обработки необходимых исходных данных, использования онтологий предметной области, построение и отладки модели, до проведения исследования и оптимизации. Т.е. реально создается единое исследовательское пространство с общим центром управления на основе всех доступных знаний и данных.

Кроме этого, можно отметить факт значительного усложнения моделей. Современные технологии позволяют создавать не простые учебные и исследовательские модели (как правило, одноразовые модели), а мощные и практически значимые модели. Например, наш собственный опыт работы с моделями на языке GPSS наглядно демонстрирует: в рамках языка GPSS World Core после достижения объема модели свыше 5000 блоков – практически невозможно усложнять модель, а при использовании иерархического графического проектирования модели, Unit тестирования отдельных малых фрагментов (ТЭБ) и новых инструментов отладки в среде моделирования GPSS Studio – возможно написание понятных и хорошо сопровождаемых моделей в 300 000 блоков и более.

Кроме повышения сложности разрабатываемых моделей, можно говорить об упрощении их модернизации при последующих изменениях. В результате, создаются модели, рассчитанные на многостороннее применение (после небольших доработок) во время всего жизненного цикла системы – от момента ее создания и до завершения ее использования (рис. 4).



Рис. 4. Соответствие жизненного цикла модели и системы

Имитационная модель уже не живет сама по себе, и по запросам пользователей все чаще требуется не просто создать модель и провести исследование при проектировании или модернизации системы, но и внедрить модель в среду существования самой системы для создания интеллектуального подсказчика, автоматизированной или автоматической системы принятия управленческих решений.

В целом, комплексный подход к созданию и использованию модели, а также необходимые для его реализации инструменты можно представить в виде, показанном на рис. 5.



Рис. 5. Комплексность подхода в имитационном моделировании

По своей сути жизненный цикл имитационной модели все чаще становится значительно длиннее, по причине более частого включения ИМ в системы принятия решений, пусть даже и после преобразования модели в нейросеть. Полученные от модели данные становятся серьезным подспорьем в создании необходимого «датасета» для получения очень быстрых экспертных систем различного уровня сложности.

Существенным отличием последних лет развития ИМ является факт появления современных платформ ИМ, вместо использования отдельных языков и систем моделирования. Дальнейшее развитие методов и технологии идет уже в рамках таких платформ, в которые шаг за шагом добавляются новые программные инструменты, необходимые для проведения всестороннего и качественного анализа, исследования и управления сложной системой, а также обеспечивается унифицированный обмен данными и результатами, как внутри платформы, так и с внешними системами.

В США и Европе создание платформ имитационного моделирования идет уже достаточно давно, вот примеры нескольких успешных решений:

- в компании SIMIO (США) создали мощную платформу, которая называется «Программное обеспечение для моделирования цифровых двойников» [10];
- существенных результатов достигла и Simul8 Corporation (США) при создании и развитии платформы моделирования Simul8 [11];
- одним из основных разработчиков ИМ The AnyLogic Company (США) также создана платформа на основе своего инструмента AnyLogic [12].

В России также создаются такие платформы, которые практически не отстают от мирового уровня. Например, ООО «Элина-Компьютер» создана платформа моделирования ALINA GPSS [13], в ООО «Амальгама» создана Amalgama platform [14].

К основным трендам развития современных платформ ИМ можно отнести:

- междисциплинарное взаимодействие ИМ с максимально возможным объемом знаний, данных и другими автоматизированными системами в контуре решения задач анализа синтеза сложной системы;
- комплексное использование в ИМ других математических подходов, инженерных расчетов и цифровых технологий, необходимых в имитационном исследовании или в процессе практического применения модели;
- широкое использование более мощных вычислительных ресурсов, технологий удаленных и распределенных вычислений, в том числе и начало использования квантовых вычислений;

- применение, как стандарта «де факто», концепций Low-code при разработке моделей и No-code при их использовании конечным пользователем за счет создания библиотек шаблонов, широкого использования графического и иерархического описания системы, WEB программирование, анимация и графики и т.д.;

- постепенное занятие центральной роли при создании динамической модели ядра цифрового двойника системы, для обеспечения его использования в управлении самой системой;

- взаимодополнение методов: моделей ИИ (нейронных сетей) генерацией синтетических данных из ИМ моделей и ускорение исполнения ИМ моделей, в основном в цифровых двойниках, за счет замены их моделями ИИ.

Построенные таким образом программные платформы дают возможность не только создания многофункциональной и адекватной модели для стратегического исследования, но и позволяют сформировать быстрый и качественный ответ в виде управляющего решения в цифровом двойнике.

Использование ИМ в цифровых двойниках

Впервые концепцию цифрового двойника описал в 2002 году Майкл Гривс, профессор Мичиганского университета. В своей книге [15] он предложил рассматривать цифровой двойник, состоящий из трех основных частей, которые очень близки к объектам изучаемым и используемым в ИМ:

- физический продукт в реальном пространстве; в терминологии ИМ это изучаемая или управляемая нами сложная система;

- виртуальный продукт в виртуальном пространстве; это сама модель и ее детальное визуальное описание;

- данные и информация, которые объединяют виртуальный и физический продукт; в имитационном исследовании это взаимосвязь с моделью в ритме принятия управленческих решений.

Мощный толчок в развитии цифровых двойников и выход технологии на пик цикла завышенных ожиданий по Гартнеру произошел за счет активного использования метода искусственного интеллекта и IoT технологии «Интернет вещей». К 2018 году технология вошла в список 10 инновационных технологий и оказались на пике своего развития. Сейчас, после естественного спада, технология постепенно развивается и выходит на плато продуктивности.

Согласно фундаментальной работе Прохорова А. [16] графически цифровой двойник можно представить как пересечение множества цифровых копий системы (рис. 6).

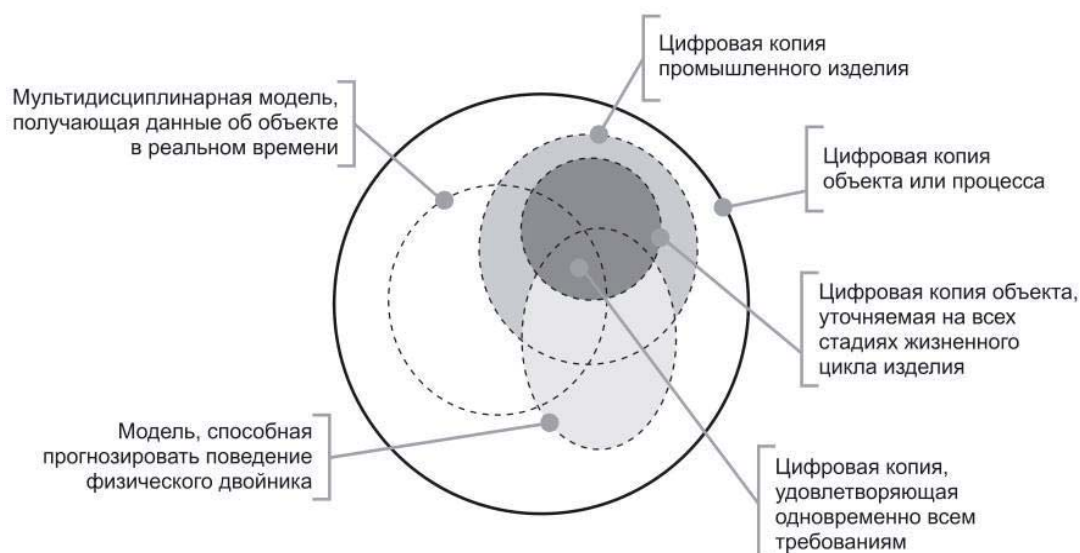


Рис. 6. Графическое представление цифрового двойника

Как видим, в этом представлении показана модель для прогнозирования поведения физического двойника и мультидисциплинарная модель получения данных об объекте в реальном времени. По сути, в качестве этих моделей может выступать имитационная модель системы, созданная с помощью одной из платформ ИМ и готовая (по времени исполнения) к выработке управляющих решений. И эта готовность стала возможной именно в настоящее время, так как ранее одним из основных недостатков ИМ являлась длительность исполнения модели. Сейчас, во многих случаях, время исполнения модели укладывается в требуемый ритм принятия управленческих решений в системе (рис. 7).

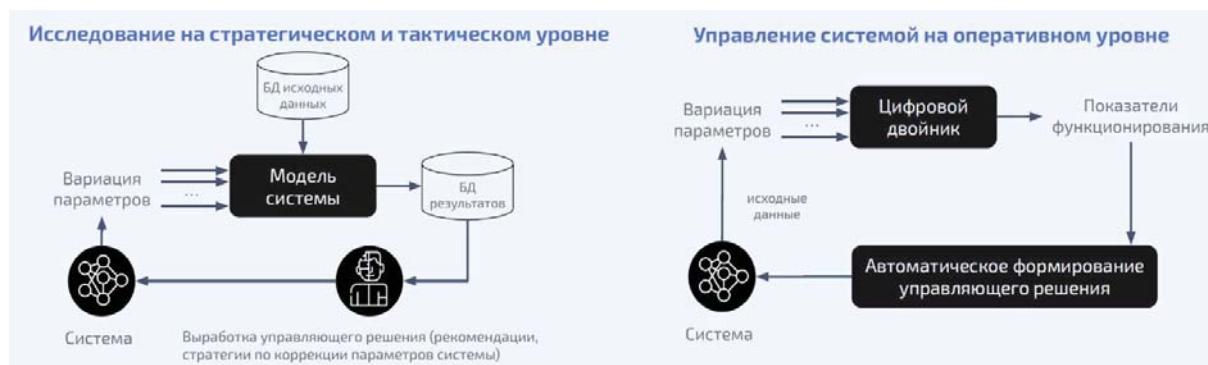


Рис. 7. От стратегического исследования к тактическому управлению

Таким образом, если цифровой двойник системы является интегратором всех сквозных цифровых технологий, то имитационная модель, по сути, может быть управляющим ядром при управлении цифровым двойником.

Пока таких примеров применения очень мало, но ближайшие годы развития покажут массовое использование ИМ (или в качестве ее замены для быстродействия — нейронных сетей) в управлении транспортными, производственными, логистическими и другими системами.

Особо следует отметить, что цифровые двойники, наряду с ИМ, уже в течение многих лет являются частью ИТ ландшафта предприятий (рис. 8).



Рис. 8. Место цифрового двойника в ИТ ландшафте предприятия

Пока на практике, создание цифровых двойников и использование ИМ чаще всего происходит независимо друг от друга. Очевидно, что необходимо синхронизировать эти процессы и всегда включать в процесс создания цифрового двойника имитационную модель, тем более, что сейчас в рамках ИМ возможно объединение различных междисциплинарных моделей. Следует отметить, что и на предприятиях постепенно приходит понимание неизбежности этого процесса. Например, все чаще появляются реальные запросы на создание интеллектуальных подсказчиков для управления той или иной сложной системой. Что практически является прототипом будущего движения к полноценному цифровому двойнику этой системы.

Следует также отметить, что в рамках той или иной сложной системы и на разных стадиях ее жизненного цикла может быть создано несколько цифровых двойников – в зависимости от полноты и точности создаваемой цифровой копии. Полнота и точность зависят от степени детализации системы в модели, от направленности исследования или модернизации системы, конкретных задач управления системой, от объема доступных данных и т.д. Т.е. можно говорить множестве параллельных или взаимодополняющих копий цифрового двойника, в зависимости от степени проработки иди этапа жизненного цикла системы (модели).

В то же время, достаточно много предприятий, финансово готовых к применению, не готовы методически и технологически. И, прежде чем начать использовать ИМ, предприятию нужно перейти на новый уровень цифровизации, уйти от старых технологий (например, когда большинство расчетов выполняется в Excel таблицах) и постепенно начать формировать современный ИТ ландшафт предприятия. В этом также наше сообщество может определенным образом помочь, донести до них каким образом это сделать лучше и эффективнее.

Расширение классического использования ИМ

Рассмотрим примеры расширения использования моделирования за счет методов и инструментов, доступных на современных платформах ИМ.

В нашей практике имеется интересный пример применения имитационного моделирования для решения задач на всех трех горизонтах планирования (стратегический, тактический и оперативный) – выполнение и дальнейшее развитие работы по оптимизации функционирования светофорных объектов сегмента УДС. Сначала целью данной работы являлось стратегическое и тактическое планирование:

создание системы поддержки принятия решений ЕИМ при проектировании, обслуживании, модернизации и эксплуатации транспортной сети (рис. 9).

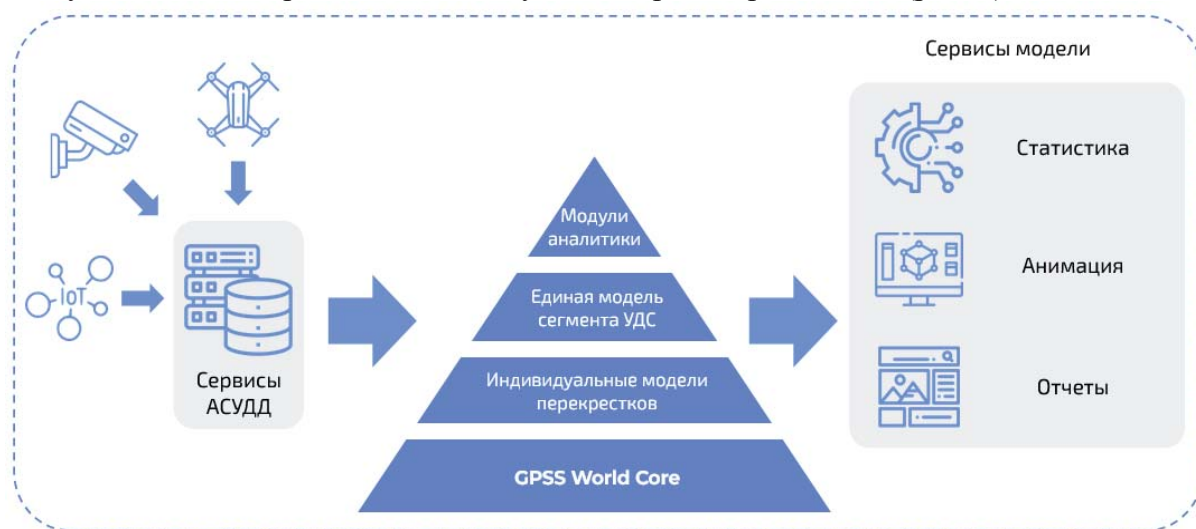


Рис. 9. Архитектура системы ЕИМ

На этом уровне модель была связана реальной системой через автоматизированную систему управления дорожным движением (облачное решение учета транспортных средств при помощи датчиков).

В рамках дальнейшего развития данного комплекса на одном перекрестке для повышения реактивности отклика, в дополнение к имитационной модели, была создана нейронная сеть, обученная на данных из имитационной модели, которая в дальнейшем была подключена к действующему контроллеру управления перекрестком и смогла осуществлять адаптивное управление данным перекрестком в реальном времени. Сейчас проводится масштабирование решения на весь сегмент УДС. Таким образом, можно с уверенностью говорить о реальной возможности создании цифрового двойника системы адаптивного управления дорожным движением в рамках сегмента УДС. Данный пример показывает, что наряду с повышением быстродействия выработки управления, синтетические данные, полученные из имитационной модели, дают возможность получить качественный результат при реальном оперативном управлении сложной системой, описанной в имитационной модели.

Другим примером более расширенного использования ИМ является разработка рекомендаций для уточнений разработанного производственного плана MES системой предприятия. Для одного из предприятий топливного дивизиона ГК «Росатом» была разработана имитационная модель для анализа логистических процессов цеха. Необходимость разработки такой модели возникла в связи с тем, что подсистема планирования производства не могла в полной мере учесть детали, особенности, алгоритмы и организацию внутренней логистики одного из крупнейших и ключевых цехов предприятия. А это могло привести к ошибкам при сменно-суточном планировании, а в результате важнейшие показатели производства – длительности протекания процесса (ДПП) изготовления продукции в рамках заказа и объемы незавершенного производства (НЗП) могут быть недопустимо высоки. В результате выполнения работы была выявлена необходимость создания двух вариантов имитационного приложения (рис. 10):

- вариант А. Приложение, автоматически генерирующее модель по файлам исходных данных, созданное в виде сервиса, работающего по технологии No code, с которым может взаимодействовать специалист-аналитик предприятия для тактического

и стратегического исследования логистической подсистемы цеха и анализа влияния ее на основные показатели выполнения производственного задания;

– вариант В. Приложение, также автоматически генерирующее модель по файлам исходных данных, обладающее минимальным интерфейсом и взаимодействующее с MES в автоматическом режиме для формирования и передачи рекомендаций по учету структуры, организации и правил работы логистической системы при разработке уточненного сменно-суточного задания.

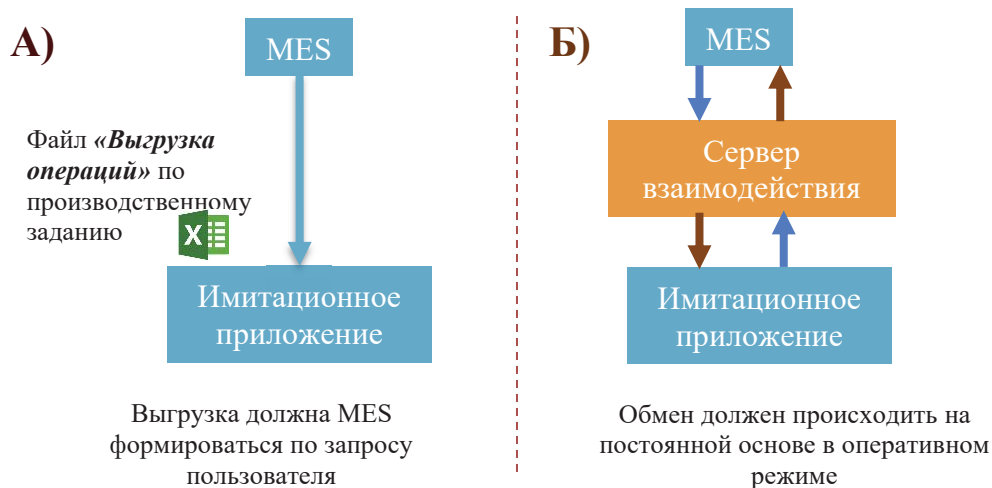


Рис. 10. Взаимодействие MES системы и имитационного приложения

Данный пример также является реализацией подхода создания цифрового двойника для управления производством (цехом) в части планирования производства в режиме реального времени при помощи имитационной модели. Причем, результат работы имитационной модели позволяет не только вырабатывать рекомендации для подсистемы производственного планирования MES (снижая при этом ДПП и НЗП), но и показывать «узкие места» производства, уточнять НСИ по используемым технологиям, анализировать загрузку персонала и оборудования.

Также на одном из предприятий ГК «Росатом» была проведена работа не только по созданию имитационной модели, но и последующего нахождения оптимального режима работы цеха на основе перевода имитационной модели в формат аналитической записи QUBO, используемого в квантовых вычислениях.

Задача создания ИМ работы цеха, поставленная перед нами, являлась простейшей – в ней было необходимо максимизировать объемы выпуска готовой продукции при задании границ вариации факторов и в рамках объективной системы ограничений по ряду показателей функционирования цеха.

Задача оптимизации решалась с помощью двух подходов (рис. 11):

– классических вычислений, когда на обычном компьютере инструментами платформы ALINA GPSS строилась имитационная модель, ставилась задача оптимизации и проводились оптимизирующие эксперименты с помощью Black Box оптимизатора;

– гибридных вычислений, когда на классическом компьютере инструментами платформы ALINA GPSS строилась имитационная модель, ставилась задача оптимизации, а собственно оптимизация производилась с помощью квантово-вдохновленного оптимизатора.



Рис. 11. Принципиальная схема оптимизации с использованием имитационного моделирования и квантово-вдохновленных алгоритмов

Для проведения возможности оптимизации с помощью квантово-вдохновленного оптимизатора была проведена разработка прототипа будущей программной системы. Осуществлена доработка в подсистеме планирования экспериментов платформы ALINA GPSS для организации и проведения автоматической серии экспериментов и построения на их основе аналитической записи QUBO. Создан специальный API для передачи аналитической записи в квантово-вдохновленный оптимизатор и получения обратно результатов оптимизации.

В варианте классических вычислений, в рамках одного оптимизирующего эксперимента, Black Box оптимизатор дал ответ на поставленную задачу приблизительно за 15 минут. Оптимизатор, основанный на квантовых вычислениях, дал результат на 99,4% совпадающий с тем, что был получен классическим способом, но за 2 секунды. Стоит отметить, что на создание аналитической записи было затрачено около 20 минут.

Казалось бы, что «овчинка выделки не стоит». Но данный подход интересен в первую очередь не в разовых оптимизирующих экспериментах, а в регулярных и постоянных экспериментах для управления системой через цифровой двойник. Тогда нет необходимости каждый раз вычислять аналитическую запись, а можно сразу использовать предварительно построенную запись. В этом случае выигрыш очевиден, и он колоссальный. Особенно это будет проявляться на больших моделях и в большей степени, когда вместо эмулятора квантово-вдохновленного оптимизатора будет получена возможность проведения вычислений на реальном квантовом компьютере. Для широкого практического внедрения такого подхода необходимо провести дополнительные научные исследования для гарантированно точного построения аналитической записи.

В данном подходе есть свои минусы, но данный пример позволяет продемонстрировать новое, гибридное использование имитационных моделей и дает направление развития реальных практических применений квантовых вычислений.

Заключение

Таким образом, проанализировав текущую ситуацию рынка ИМ в мире и в России, а также основные тенденции его развития, можно сделать следующие выводы:

- рынок ИМ в России – перспективная и динамически развивающаяся отрасль, потенциал рынка огромен и имеет тенденцию постоянного роста на многие годы вперед;
- имеются достаточно серьезные и мощные отечественные платформы ИМ, готовые заместить ушедшие с нашего рынка зарубежные платформы и системы;

– существенно расширяются границы использования метода за счет повышения производительности классических вычислений – стало доступно практическое исследование более масштабных (вширь) или детальных (в глубину) систем;

– появилась новая ниша взаимодополняющего комплексного использования ИМ, нейронных сетей и квантовых вычислений для управления системой в цифровых двойниках.

Литература

1. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем / Н.П.Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400с.
2. **Нейлор, Т.** Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / Т. Нейлор; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 500 с.
3. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
4. Фенн, Джеки; Раскино, Марк (2008). Управление циклом хайпа: как выбрать правильную инновацию в нужное время. Harvard Business Review Press. стр. xiii. ISBN 978-1-4221-2110-8.
5. **Девятков В.В.** Мир имитационного моделирования: взгляд из России / В.В. Девятков // Прикладная информатика. – 2011. – № 4. – С. 9-29.
6. **Борщев А.В.** Имитационное моделирование: состояние отрасли на 2015 год, тенденции и прогноз/ А.В. Борщев// Автоматизация в промышленности. – 2016. – февраль. – 35-39.
7. Выявление значимых долгосрочных тенденций развития технологий цифровых двойников в атомной отрасли / отчет по НИР. – М: Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ», 2025 г. – 100 с.
8. Портала данных о предприятиях СПАРК агентства Интерфакс /<https://spark-interfax.ru/statistics> Электронный ресурс (дата обращения 22.09.2025).
9. Simulation Software Market Share, Forecast & Growth Report. MarketsandMarkets™ INC. – 2024 – 343p./ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/simulation-software-market-263646018.html> Электронный ресурс (дата обращения 22.09.2025).
10. SIMIO Digital Twin Simulation Software» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.simio.com/> (дата обращения: 16.09.2025).
11. Решения SIMUL8. [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.simul8.com/> (дата обращения: 16.09.2025).
12. «Инструмент моделирования AnyLogic» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://the.anylogic.company/> (дата обращения: 26.08.2025).
13. Реестр программного обеспечения «Платформа имитационного моделирования Alina GPSS» [Электронный ресурс], – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/305965/?sphrase_id=965110 (дата обращения: 16.09.2025).
14. Amalgama Platform. [Электронный ресурс], – Режим доступа <https://amalgamasimulation.ru/products/> (дата обращения: 22.09.2025).
15. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. A Whitepaper by Dr. Michael Grieves 2014
16. **Прохоров А., Лысачев М.** / Цифровой двойник: Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.