

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.В. Девятков, Р.Р. Минниханов, В.М. Шестюк (Казань)

### ВВЕДЕНИЕ

ИМ используется на практике уже свыше 50 лет. Кажется, все направления и нюансы применений моделирования давно изучены и общеизвестны. Тем не менее, вопрос «А где и для исследования каких систем, можно использовать ИМ?», актуален и сейчас.

Теоретически большинство применений обоснованы давно, а на практике многие никогда и не были востребованы. Это вызвано тем, что алгоритмически и по вычислительной сложности существовавшие информационные технологии и вычислительные мощности просто не позволяли провести требуемые вычисления. А если и позволяли, то время проведения имитационного исследования существенно превышало ожидания заказчиков исследований. Во многих случаях, когда исследование заканчивалось, оно было уже не актуально. Попросту, моделирование не успевало за развитием проектируемых и эксплуатируемых систем. Сейчас, кроме повышения производительности вычислений, появляется множество новейших теоретических и методических разработок, которые можно и нужно внедрять в процесс имитационных исследований. Обобщенно всю область применения ИМ можно разделить на пять условных групп (рис. 1).



Рис. 1. Применения ИМ

Ситуация постоянно изменяется, поэтому очень важна регулярная оценка области практических применений, с учетом современных достижений и возможностей науки и технологий:

- как изменилась методология ИМ?
- какие появились новые теоретические разработки и программные решения для ранее не решенных проблем?
- что нового в теории и практике компьютерных вычислений и информационных технологий?
- появились ли новые законодательные нормы, стимулирующие проведение ИМ?

В итоге по результатам оценки можно сформулировать вопрос – как вновь появившиеся возможности позволяют расширить границы применения моделей?

Как мы уже неоднократно говорили, в целом потенциал применения ИМ и так огромен. На рис. 2 показана лишь небольшая часть возможных направлений, структуры и содержания имитационных исследований.

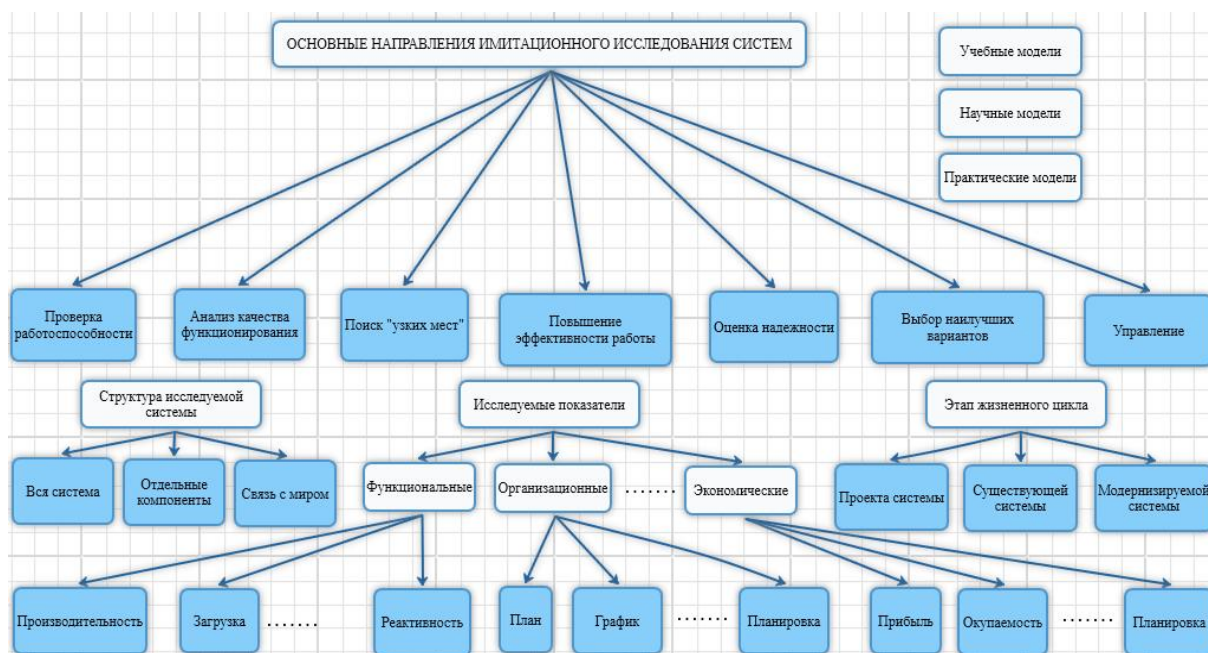


Рис. 2. Многообразие имитационных исследований

Как уже говорилось, далеко не все возможные направления исследований реализованы и используются. Например, в России этот показатель не более чем 10% [1]. Тем не менее, за последние годы появилось несколько новых «окон возможностей», что позволило активно развивать облачное моделирование, более широко использовать многопараметрическую оптимизацию и технологии виртуальной и дополненной реальности. А появление в России закона об обязательном применении ВМ моделей в строительстве с 1 января 2022 года, открывает широкие возможности использования ИМ при строительстве новых и модернизации существующих объектов.

Рассмотрим влияние некоторых трендов и возможностей на более активное использование существующих и появление новых перспективных направлений. А также, покажем практическую значимость некоторых из них на практических примерах.

### РОСТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ

Рост вычислительных мощностей является ключевым компонентом прогресса в расширении области применения ИМ. Так как имитационная модель – это программа, то, чем мощнее вычислитель, тем более сложная система может быть исследована. Т.е. можно подступиться к исследованию систем повышенной сложности и решению, ранее не доступных задач. Например, связанных с необходимостью наличия возможности для сложных систем: повышения детализации модели, проведения длительных серий экспериментов и выполнения многопараметрической оптимизации.

Прямой рост производительности одного процессора на персональных компьютерах сейчас практически прекратился, так как увеличивать количество транзисторов на микросхеме стало невозможно из-за исчерпания физических возможностей технологии. Но создаются многоядерные компьютеры, пишутся программы с параллельным кодом, производится распределение вычислений. Поэтому рост вычислительных мощностей продолжается. Анализ доступных для использования персональных компьютеров за последние годы показывает продолжение значительного (в разы) роста их производительности.

В самом общем виде, влияние увеличения производительности компьютеров на потенциал применения ИМ можно изобразить в следующем виде (рис. 3).

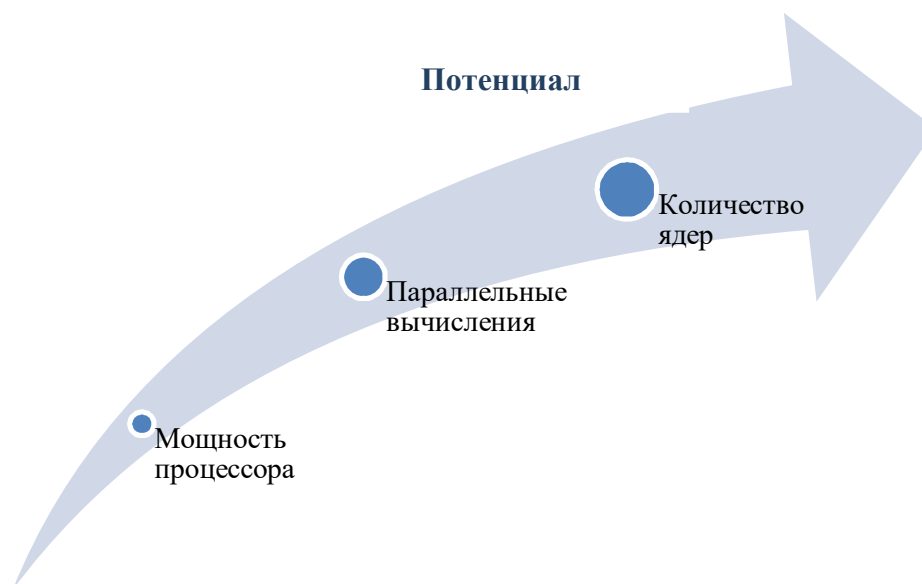


Рис. 3. Влияние мощности и архитектуры вычислений на увеличение потенциала применений

Что дает ИМ увеличение производительности вычислений?

Небольшой пример из собственного опыта. В 2005 году мы создали модель коллективного центра обработки информации Банка России, учитывающей все детали прохождения каждого платежа от юридических и физических лиц из 42 регионов России [2]. Один день работы такого центра в нашей модели исполнялся в течение почти 24 часов на достаточно мощном персональном компьютере того времени. На современном персональном компьютере такая модель выполняется уже меньше часа. Налицо, прямое повышение скорости проведения отдельного эксперимента более чем в двадцать раз.

Следует отметить, значимость наличия возможности размещения на многопроцессорном компьютере нескольких моделирующих ядер. Это значительно повышает скорость не только отдельного эксперимента, а всего имитационного исследования. Например, возможно одновременное исполнение сразу нескольких экспериментов из серии экспериментов – равное числу имеющихся процессоров. Например, архитектура среды моделирования GPSS Studio [3] позволяет использовать множество ядер моделирования, которые обычно создают в количестве, не превышающем число процессоров. И это позволяет при проведении больших серий, параллельно выполнять эксперименты. В случае сложных моделей с большой длительностью исполнения эксперимента это дает значительное повышение скорости общего процесса исследования. Кроме этого, много ядер дает возможность параллельной работы с одной вычислительной установкой нескольким пользователям, например, над одним имитационным проектом.

### **ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ**

Существенно влияют на будущий потенциал применения ИМ и новые технологические тренды. Для примера рассмотрим влияние на возможное расширение областей применения ИМ стратегических технологических трендов 2021 года от лидера в этой отрасли – компании Gartner [4].

В таблице 1 приведены пять таких трендов и как они, по нашему мнению, повлияют в будущем на расширение областей имитационных исследований.

Таблица 1. Технологические тренды Gartner и ИМ

Технологический тренд-2021 от Gartner	Влияние на потенциал ИМ
<p><b>Интернет поведения (IoB).</b> Огромное количество устройств и датчиков будет прикрепляться или даже имплантироваться в организм человека, чтобы собирать и использовать «цифровую пыль», которую он оставляет. К концу 2025 года более половины населения мира будет охвачено, по крайней мере, одной программой IoB.</p>	<p>Означает появление огромных баз данных с исходными данными и тенденции значительного роста моделей, связанных с улучшением качества жизни и защиты людей - модели пешеходной логистики, модели распространения эпидемий, модели поведения толпы и т.д.</p>
<p><b>Совокупный опыт (Total Experience).</b> Ожидается, что компании, которые обеспечивают накопление, сохранение и использование совокупного опыта, превзойдут конкурентов по ключевым показателям удовлетворённости в течение следующих трёх лет.</p>	<p>Кроме общего увеличения объема знаний еще большее понимание собственниками систем необходимости и пользы моделей, возможность более широкого и комплексного использования алгоритмов управления системами, основанными на экспертных оценках и моделях.</p>
<p><b>Повышающие конфиденциальность вычисления (Privacy-Enhancing Computation).</b> Gartner считает, что к 2025 году половина крупных компаний, наряду с обеспечением конфиденциальности данных, внедрит повышающие конфиденциальность вычисления для обработки данных в непроверенных средах и использования многосторонней аналитики данных.</p>	<p>Развитие таких подходов, позволит привлечь к применению имитационных исследований пользователей, которые не могли использовать модели ранее из-за опасений потери конфиденциальности.</p>
<p><b>Распределённое облако (Distributed Cloud).</b> Распределённое облако — это расположение общедоступных облачных сервисов за пределами физических центров обработки данных провайдера. Оно позволяет расположить центры обработки данных в любом месте. Это решает технические проблемы, а также проблемы законодательного регулирования.</p>	<p>Данная технология расширяет рамки использования систем облачного моделирования, обеспечивает использование самых современных и мощных вычислителей при экспериментах с системами повышенной сложности.</p>
<p><b>Интеллектуальный композиционный бизнес (Intelligent Composable Business).</b> Эта тенденция говорит о необходимости усовершенствовать процесс принятия решений за счёт более широкого доступа к информации и более эффективного реагирования на неё. Умные системы аккумулируют информацию о бизнес-процессах (например, производстве и продажах) и создают на её основе прогнозные сценарии. Они оптимизируют деятельность предприятия и повышают его прибыль.</p>	<p>Можно продолжить перечень интеллектуальных решений на основе больших данных, возможностью построения и использования предсказательных имитационной модели, для реализации наиболее полных и точных прогнозов.</p>

Технологический тренд-2021 от Gartner	Влияние на потенциал ИМ
<b>ИИ-инжиниринг (AI Engineering).</b> ИИ-инжиниринг стоит на трёх основных столпах — DataOps, ModelOps и DevOps — и будет способствовать повышению производительности, масштабируемости и надёжности моделей ИИ, обеспечивая при этом полную отдачу от инвестиций.	В результате, ИМ будет более широко использоваться в моделях машинного обучения ModelOps, например, используя Insight-Driven подход.

До тех пор, пока производительность компьютеров повышается, появляются новые методы, технологические тренды и стимулирующие законодательные нормы, то и реальные возможности ИМ будут все время выходить за пределы существующих границ применений.

Среди множества вновь появившихся и активно используемых применений, рассмотрим два направления, которые наиболее ярко и показательно приобрели «новое дыхание» в современных реалиях.

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И BIM МОДЕЛИ

ИМ давно и успешно применяется в области строительства на всех этапах жизненного цикла: при проектировании зданий, в процессе строительства и эксплуатации зданий. Это такие задачи, как: размещение оборудования и логистики движения людей и механизмов в здании; планирование и управление логистикой поставок материалов, оборудования и других ресурсов в процессе строительства; планирования и контроля хода строительства; анализа эвакуации при чрезвычайных ситуациях. Широкие возможности и эффективность проведения имитационных исследований при решении этих и других задач, подтверждаются многими практическими применениями по всему миру [5], [6], [7]. Но в основном это были частные случаи, а массового применения ИМ для решения таких задач не было.

Постоянный рост производительности компьютеров, совершенствование технологии вычислений, изменение нормативной базы и насущные потребности отрасли привели к комплексной автоматизации в строительстве в виде использования концепции Building Information Model или Building Information Modeling (далее BIM модель).

Для России важнейшим стимулирующим фактором комплексной автоматизации в строительстве является то, что с 1 января 2022 года разработка и ведение BIM моделей на всех этапах жизненного цикла становится обязательным для всей цепочки участников проекта – проектной организации, заказчика, застройщика, технического заказчика, эксплуатирующей организации (далее строители) – если на этот объект выделены средства «бюджетной системы Российской Федерации» [5].

Для проектов, финансируемых бизнесом, BIM модели стали использоваться еще раньше, в силу очевидных рыночных преимуществ (снижение сроков, повышение качества, оптимизация затрат).

Вопрос использования разрабатываемых BIM моделей для решения задач ИМ интересен и выгоден всем участникам процесса:

Для строителей – в силу того, что имитационная модель может «оживить» здание и прилегающую к нему территорию, наполнив ее динамикой использования помещений, переходов, лифтов, парковок, транспортной схемы и т.д. Т.е. на модели можно виртуально отработать все элементы логистики, пропускной способности, производительности и визуально проанализировать конечный результат работы всей системы в динамике – «так, как будет в жизни».

Для разработчиков ИМ – в том, что BIM модель это настоящая «кладезь» исходных данных и уже готовая 3D модель объекта, требующая лишь ряд механических действий по упрощению или дополнению перед использованием.

На рис. 4 показана концепция совместного использования BIM моделей и ИМ.

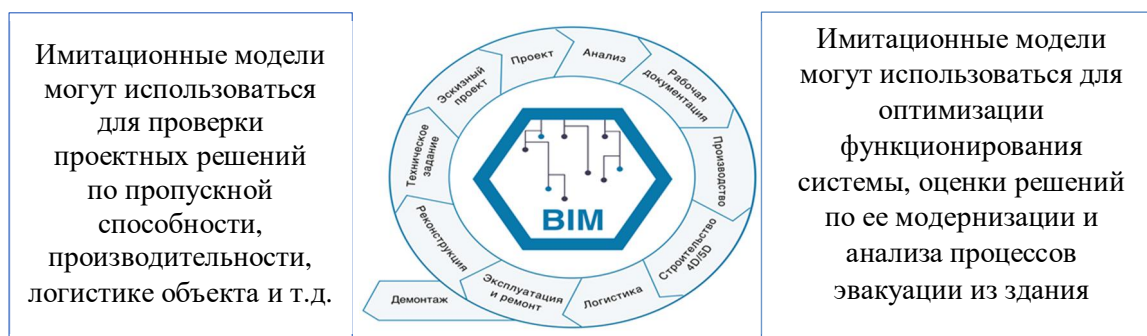


Рис. 4. Совместное применения BIM и ИМ в течение жизненного цикла объекта

Сейчас в расчетах логистики объекта и при построении схем эвакуации до сих пор используется целый ряд устаревших аналитических методик оценки проектных решений, которые были сформулированы много лет назад в СНИПах, и их результат признается при проведении различных видов строительных экспертиз. К сожалению, выводы и рекомендации имитационных исследований, если они даже проводились, при экспертизе не принимаются во внимание. Тем не менее, в связи с существенным повышением качества проекта интерес строителей к возможностям ИМ пробуждается и таких использований становится все больше.

Как видим из рис. 4 жизненный цикл BIM модели начинается с технического задания, эскизного проектирования и после эксплуатации объекта заканчивается либо реконструкцией, либо демонтажом. Естественно, что на каждом этапе жизненного цикла в том или ином виде и объеме может быть применено ИМ.

В течение 2020-2021 годов нами проведен целый ряд разработок с использованием BIM моделей на этапе проектирования – при исследовании планируемых технологий обслуживания в музее атомной энергии на ВДНХ, для анализа системы контроля доступа и логистики перемещений в проекте здания Национального космического центра и при оценке правильности решений генерального плана проекта крупного целлюлозного завода в Карелии по системе производственной логистики.

Рассмотрим один из проектов более подробно.

Имитационное исследование системы логистики входа, передвижений внутри и выхода из здания строящегося Национального космического центра показало недостаточность проектной пропускной способности оборудования контроля доступа, позволило усовершенствовать алгоритмы и технологию обслуживания во время обеденного перерыва и предложить различные подходы при планировании расписаний использования конгресс-центра.

Наличие BIM модели, импортированной из системы Revit, позволило существенно сократить сроки разработки и исследования, сделать приложение ближе к предметной области. А самое главное, удалось решить задачу более качественной подготовки к государственной экспертизе в части нахождения «узких мест», их количественной оценки и выработки рекомендаций по исправлению проектных решений.

Пример фрагментов работы с данным имитационным приложением приведен на рис. 5.



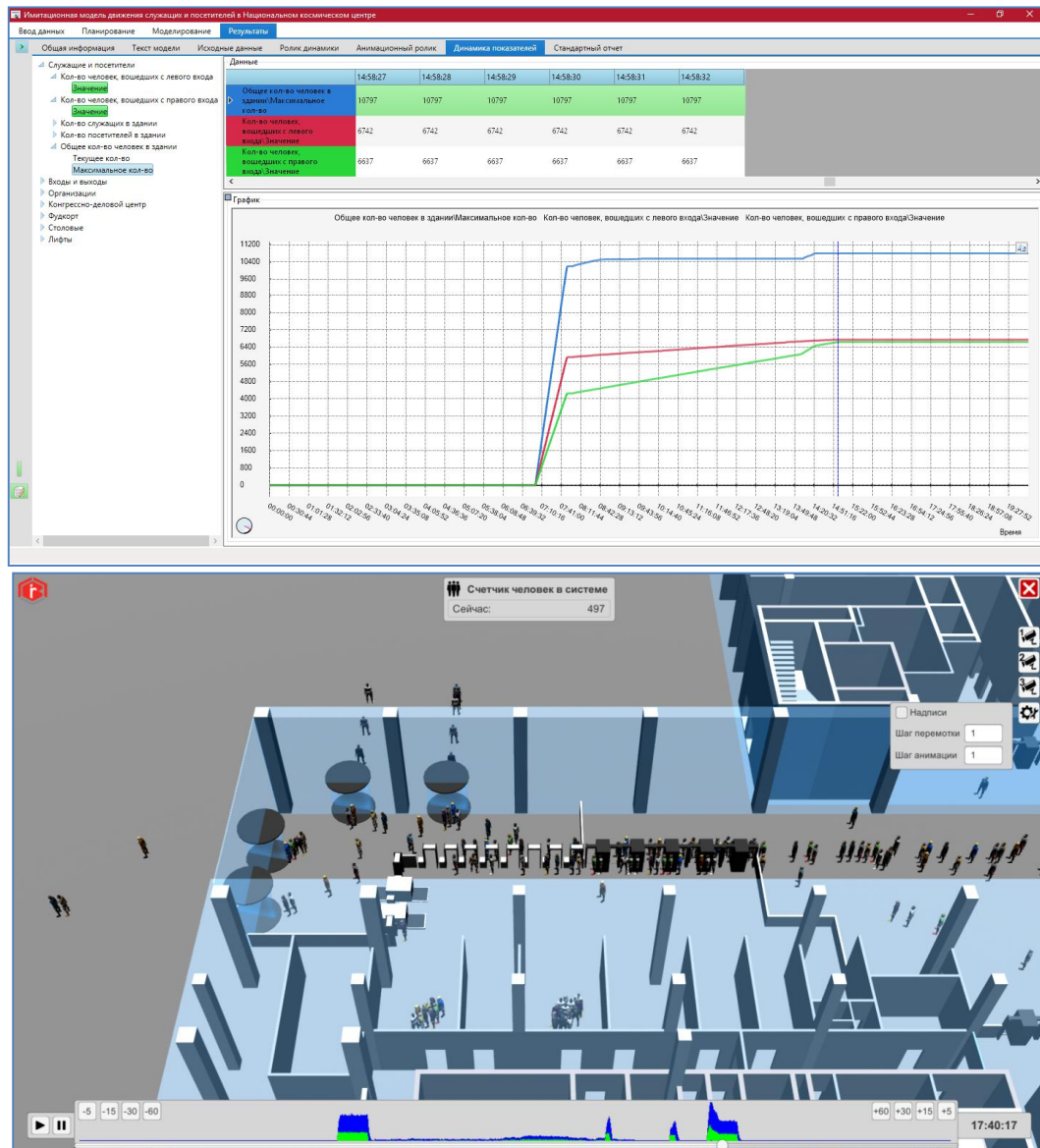


Рис. 5. Исследование системы логистики в здании Национального космического центра

Наш опыт показывает, что имитационные модели органично дополняют BIM модели и заполняют недостающую в проекте нишу проверки проектных решений в части динамических логистических процессов внутри и вокруг здания. В дальнейшем планируем создать модели и на этапах строительства и эксплуатации. Например, модель планирования поставок и хода строительства объекта и модель эвакуации людей при чрезвычайных ситуациях из здания.

## РАЗВИТИЕ ПРИМЕНЕНИЙ ИМ В КОНТУРАХ ОПЕРАТИВНОГО И СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Качество процесса управления любой системой зависит от возможности своевременного нахождения правильных и точных решений. Раньше они в основном зависели от опыта и квалификации лиц, принимающих решение. В последнее время все больше и больше акцент при подготовке, а иногда и при принятии решения, смещается в сторону автоматизированных инструментов. Например, экспертных систем, аналитических сервисов обработки больших данных и систем искусственного интеллекта. Все эти системы могут базироваться на различных методах и теоретических подходах.

Раньше, особенно при автоматизации задач оперативного управления, метод ИМ не мог использоваться в силу большой вычислительной сложности, а, следовательно, длительного времени поиска решения. Сейчас время выполнения имитационных экспериментов резко сократилось, и во многих случаях темп получения рекомендации от ИМ не превышает требования по времени выдачи управляющих решений. А в точности и качестве предлагаемых ИМ решений сомнений никогда и не было. Это наиболее детально оценивающий ситуацию, точный, интуитивно понятный и информативный метод среди всех аналитических инструментов прогнозирования.

Использование ИМ в контуре управления может быть абсолютно разным. Во-первых, оно отличается при оперативном управлении от стратегического управления. Во-вторых, зависит от способа использования прогноза – рекомендательного (ручного) или обязательного (автоматического) при формировании управляющего решения.

Если прогнозирование с использованием ИМ на стратегическом уровне достаточно проработано и широко используется, то формирование оперативных управленческих решений достаточно новая область применений. Поэтому рассмотрим ее более подробно.

При стратегическом планировании и управлении ИМ чаще используется как дополнительный аналитический инструмент. В случае оперативного управления наиболее востребовано автоматическое формирование решений, а модель выступает в роли программы «Решатель» в контуре управления (рис. 6).

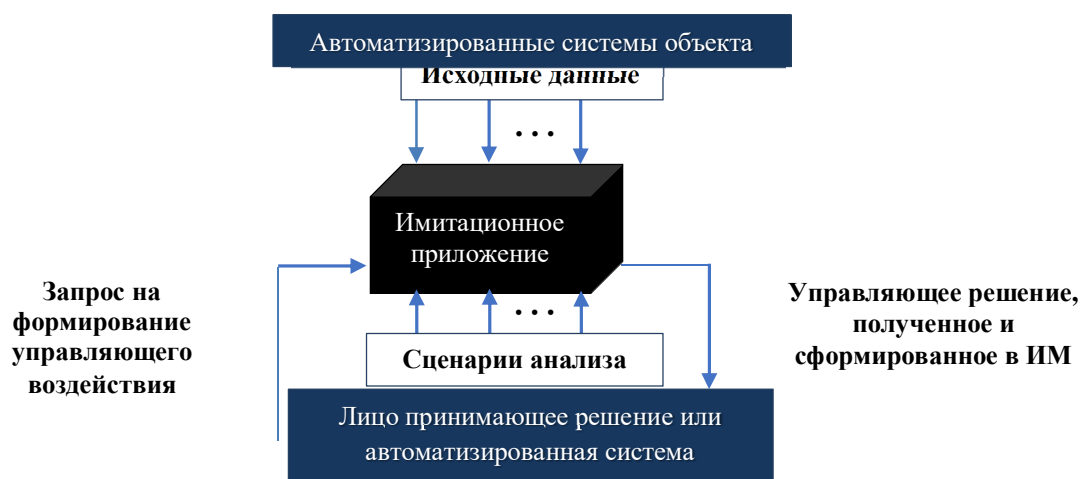


Рис. 6. ИМ модель, как «Решатель»

При использовании в оперативном контуре управления, кроме быстрого действия, инструмент ИМ должен обеспечить множество дополнительных возможностей:

- запуск в различных режимах (пакетном, реальном или масштабируемом по времени);
- наличия API или возможности его разработки;
- возможности работы с сервисной шиной;
- возможности коллективной удаленной работы с приложением;
- возможности работы с облачными сервисами;
- возможности удаленного запуска моделирования;
- возможностей работы с сервисом данных приложения.

В качестве примера использования ИМ в контуре управления рассмотрим концепции построения платформы регионального управления, основанного на данных (далее РПУД). Мы являемся непосредственными участниками этого проекта. Данная платформа строится как продолжение НСУД – национальной системы управления



данными для последующего использования в регионах России. Но имеются значительные архитектурные и функциональные отличия этих платформ.

НСУД используется в основном для централизованного накопления данных, организации межведомственного обмена и оказания государственных услуг населению и предприятиям. Есть и ряд аналитических подсистем, но на данный момент они разрознены по министерствам, национальным проектам и не имеют какой-то ярко выраженной централизации. Планирование и прогнозирование осуществляется на макро уровне, основываясь на общей BI аналитике. В основном превалирует концепция датацентричного управления.

РПУД – это общая концепция управления, базирующаяся на сборе и анализе данных, оценке текущей ситуации непосредственно с самих объектов, построении аналитических прогнозов на их основе, а также построения прогнозов функционирования в регионе любого инфраструктурного объекта или предприятия отрасли до региона в целом. В РПУД происходит переход на гибрид двух концепций – датацентричного и модели-ориентированного управления.

На рис. 7 показано взаимодействие различных уровней управления.



Рис. 7. Уровни управления

Роль ИМ в этом виде управления достаточно велика.

На рис. 8 показан концептуальный уровень архитектуры РПУД.

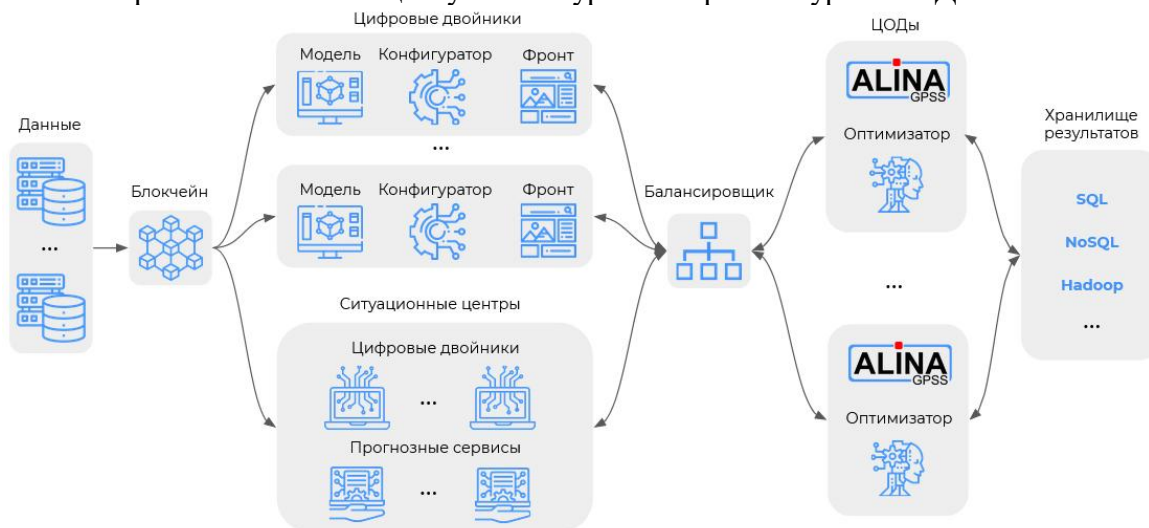


Рис. 8. Принципиальная архитектура РПУД

Мы понимаем, что построение системы модели-ориентированного управления и реализация системы прогнозирования в ее составе – это достаточно длительный процесс и пройдет немало лет, чтобы мы могли сказать: «Имитационные модели действительно массово используются в контуре оперативного управления».

От потенциальных применений к реальному использованию

Любое практическое имитационное исследование обеспечивается инструментами ИМ – языками и средами моделирования. От того, как эти инструменты поспевают за временем и развитием методов и технологий, зависит практическая реализация потенциала применения ИМ, о которой шла речь выше. Как бы мы не говорили, что то или иное направление становится теоретически доступным для проведения ИМ и привлекательным для пользователей, на практике возможность реализации применения подтверждается только созданием модели в конкретном симуляторе. Т.е. инструменты ИМ являются последней инстанцией, в которой теоретическая возможность применения становится практической.

Поэтому для разработчиков каждого инструмента ИМ важно отслеживать все технологические тренды, новые методические, теоретические и программные возможности. И от того, как разработчик уловит эти изменения и реализует их в своем продукте, зависит его успех на рынке.

Негативным примером долгого отсутствия изменений в популярном и известном инструменте ИМ и, как следствие, утери рынка, является пример языка GPSS World. В последние годы сопровождение и развитие продукта полностью перешло в наши руки, и мы пытаемся наверстать упущенное.

Покажем эволюцию расширения практических областей применения языка GPSS на нескольких примерах функционального развития среды GPSS Studio (таблица 2).

Таблица 2. Новая функция – новые области применений

Новая функция	Что она позволяет сделать	Новые применения
Представление модели системы в виде структурной схемы	Детально проработать всю структуру и довести размеры логически понятной и сопровождаемой модели с 5000 блоков, до нескольких сотен тысяч блоков	Реализация сложных коммерческих проектов для крупных предприятий и проектов. Например, разработка АС «Сириус» для судостроения
Создание не зависимых от среды моделирования имитационных приложений	Конструировать предметно-ориентированные на область исследования приложения и использовать их пользователями не профессионалами ИМ	Быстрая (от недели до месяца) реализация коммерческих проектов для небольших по размеру предприятий и проектов. Например, модель пешеходной логистики Национального космического центра

Новая функция	Что она позволяет сделать	Новые применения
Автоматическая генерация отчетов	Создавать виртуальный отчет в процессе исследования, генерировать произвольные формы итоговых отчетов, сохранять их в общедоступных форматах MS Excel и MS Word	В областях требующих однозначные и точные формы представления результатов. Например, в проекте анализа производственной логистики целлюлозного завода
Анимационное представление результатов	Создавать визуальное виртуальное пространство модели, осуществлять отладку модели в динамике, наглядно презентовать функционирование системы	Охватить те области применений, в которых без анимации сложно оценивать результат – транспортные системы, системы логистики и т.д. Например, в проекте регулирования и управления сетью светофорных объектов г. Казани
Использование в модели внешней программы на другом языке программирования	Вставлять в любое место модели вызов внешней программы для реализации функций, отсутствующих в симуляторе. Позволяет управлять процессом исполнения модели	Расширяет все области применения за счет увеличения глубины и вариативности имитационного исследования

Оценить влияние приведенных в таблице изменений удалось в связи с тем, что все они были введены в среду моделирования за короткий период времени, что в явном виде отразилось на реальных практических применениях и показателях лицензионных продаж. Например, оборот направления коммерческих исследований за два последних года увеличился более чем в два раза, примерно в аналогичной пропорции снизилось и время проведения имитационных исследований.

### Заключение

Исходя из результатов анализа и исследований, приведенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

- потенциал применений ИМ непрерывно расширяется за счет объективных факторов: повышения производительности вычислений, появления новых теоретических, методологических и объявления и внедрения новых технологических трендов;
- практические применения ИМ расширяются в основном за счет субъективных факторов: совершенствования возможностей инструментов ИМ разработчиками;
- в целом рынок применений ИМ можно характеризовать как уверенно развивающийся с потенциалом бурного роста;
- стимулирующим фактором быстрого роста рынка применений ИМ явилось бы завершение начатой обществом НП «НОИМ» работы по проведению законодательной инициативы об обязательности имитационных исследований.

**Литература**

1. **Девятков В.В.** Эволюция имитационного моделирования – от «искусства и науки» к массовому применению // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. – Спб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 27-36.
2. **Козлов А.Н., Девятков Т.В., Кейер П.А.** Исследование функционирования центра коллективной обработки информации методом имитационного моделирования // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов третьей всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2007. Том 2. Спб.: ФГУП ЦНИИТС. 2007. С. 96-100.
3. **Т.В. Девятков, С.А. Власов, В.В. Девятков** Универсальная моделирующая среда для разработки имитационных приложений // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. №2/2009. С. 5-12.
4. Gartner Identifies the Top Strategic Technology Trends for 2021. Официальный сайт компании <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-19-gartner-identifies-the-top-strategic-technology-trends-for-2021> (Дата обращения 03.08.2021 г.)
5. **Zeigler Bernard P., Hammonds Phillip E.** (2007-08-21). Modeling & Simulation-Based Data Engineering: Introducing Pragmatics into Ontologies for Net-Centric Information Exchange. Computer Science. 2007.
6. **Пахотина Н. В.** Имитационное моделирование реализации строительных проектов // Проект СИРЕНА: Опыт моделирования и анализа регионального развития. Под ред. С.А. Суспицина, В.И. Клисторина. Н.: ИЭиОПП СО РАН, 2004. С. 107-129.
7. **Тимофеев Ю.Л.** Имитационное моделирование технологических процессов строительства: Учебное пособие. Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2007. 78 с.