

ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДО ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

С. А. Власов (Москва), В. В. Девятков (Казань), Н. Б. Кобелев (Москва)

Имитационное моделирование (ИМ) неуклонно становится эффективным средством для совершенствования процессов проектирования и модернизации сложных систем. Многие годы ИМ успешно применяется при обучении системному анализу в ВУЗах и выполнении крупных научных проектов для анализа, оценки и прогнозирования вариантов решений. Кроме учебного и научного использования ИМ появляется все больше примеров практических применений моделей в реальной экономике. Только за несколько последних лет авторы участвовали в реализации ряда проектов по созданию систем автоматизации имитационных исследований (САИИ) в различных областях экономики, авиации, железнодорожном транспорте, металлургии, нефтедобыче, судостроении и т.д. [1–5]

Учебные модели обычно несложны по логике, структуре и объему, но зато их много. В масштабах России – это сотни вузов и десятки тысяч новых моделей ежегодно. Чаще всего это модели, объемом не превышающие 100–150 блоков (в терминологии языка GPSS). В связи с этим при выполнении лабораторных заданий, курсовых и дипломных работ не проводится детальное исследование. Обычно ограничиваются процессом написания модели, ее отладкой и проведением небольшого количества экспериментов (от нескольких единиц до нескольких десятков). Конечно, студенты и аспиранты могут создавать большие и сложные модели, но чаще всего в учебном процессе используются бесплатные студенческие версии систем ИМ, в которых основным ограничением является объем модели. В настоящее время проводится серьезное оснащение вузов лицензионным программным обеспечением, надеемся, что будут приобретены и академические лицензии лучших языков ИМ и САИИ. Тогда появятся сложные учебные модели, будут проводиться более детальные имитационные исследования. Студенты получат более качественные знания и навыки, которые смогут использовать в своей будущей деятельности.

Научные модели всегда отличались сложностью и глубиной проводимых с их помощью исследований. Это модели, содержащие сотни и даже тысячи варьируемых параметров (факторов). При этом анализируются десятки самых разнообразных показателей работы модели. В научных имитационных исследованиях на практике для получения качественного и точного решения требуется проведение множества серий экспериментов. Чаще всего, для сложных систем – это сотни и тысячи экспериментов. Далее все результаты этих экспериментов нужно обработать и комплексно проанализировать. Исследователь должен найти разумный, подходящий, а еще лучше оптимальный режим функционирования системы. В нашей стране сегодняшняя ситуация с научными имитационными исследованиями удручает, их практически нет. Парадокс, но при выполнении исследований даже используются бесплатные студенческие или устаревшие (ранее приобретенные или пиратские) версии систем ИМ. Но, мы верим, что в этом секторе применения ИМ наступит прорыв, все предпосылки для этого есть. Ведущие НИИ начинают приобретать или заказывать современные САИИ, их состав пополняют молодые амбициозные сотрудники, часто защищающие диссертации в области ИМ. Скорее всего, в ближайшие годы следует ожидать значительного увеличения количества научных моделей и повышения их вычислительной сложности.

В последние годы резко выросло **практическое использование имитационных исследований**. Особенно это характерно для крупных предприятий различных отраслей. По существу, именно этот сектор применения позволил выжить компаниям – раз-

работчикам средств ИМ и стал катализатором развития всех типов САИИ. Учитывая особенности и запросы аналитиков предприятий, сформировался ориентированный на корпоративные предприятия тип САИИ – имитационные приложения. Был создан целый класс новых, ранее не проработанных элементов технологии создания САИИ – автоматической генерации моделей, автоматического интерфейса с системами мониторинга данных, обработки выборок большой размерности, распределенной обработки действий исследователя на различных этапах исследования, создание специализированных языков диалога, ввода исходных данных модели и вывода результатов моделирования, автоматизированного документирования результатов имитационного исследования.

Опыт разработки и эксплуатации имитационных приложений не только позволил усовершенствовать существующий процесс исследований, но и показал, что необходимы радикальные изменения в традиционном подходе к имитационным исследованиям: технологии создания модели и проведения исследований, архитектуре организации вычислений, методах взаимодействия пользователя с системой, стандартизации интерфейсов и т.д.

Все множество создаваемых САИИ можно разделить на три типа: для профессионалов, для массового использования и для корпоративных клиентов [6], [7]. Каждый тип имеет свои функциональные, вычислительные и прикладные особенности.

В частности в **САИИ для профессионалов** больше уделяется внимания вопросам построения и отладки модели, проверке адекватности модели, технике и технологии проведения всего цикла имитационных исследований. Пользователями этого типа САИИ являются высококвалифицированные и подготовленные в области системных исследований и информатики специалисты: студенты, преподаватели, аспиранты и докторанты специализированных вузов, научные работники НИИ, системные аналитики предприятий и организаций, поэтому в меньшей степени они нуждаются в упрощении языка взаимодействия с системой, и в большей степени им необходим как можно более полный функционал для построения моделей и проведения исследований.

В **САИИ для массового использования**, наоборот, на первый план выходит простота и наглядность использования системы, снижение квалификационных требований для потенциальных пользователей. Пользователями этого типа САИИ могут быть специалисты, имеющие лишь навык работы с компьютером и не имеющие специальных знаний по системному анализу: студенты, преподаватели, аспиранты научные работники, руководители, системные аналитики и инженеры любых вузов, предприятий и организаций. САИИ этого типа, расширяя круг потенциальных пользователей ИМ, позволяют строить модели не столь детально как у профессионалов. В то же время уровень получаемых результатов исследования достаточен для оперативного и точного прогноза функционирования моделируемой системы.

В **САИИ для корпоративных клиентов** (имитационных приложениях), в дополнение к еще большей простоте и наглядности САИИ для массового использования и детальности, САИИ для профессионалов, добавляется специфика Заказчика: привязка к существующим БД исходных данных, формам представления данных и результатов, сложившихся в данной предметной области. Использовать имитационные приложения могут руководители, системные аналитики и специалисты только данного предприятия в соответствии с ролью, отведенной разработчиками приложения при его создании. Язык взаимодействия пользователя с САИИ данного типа полностью «привязан» к предметной области деятельности Заказчика.

Возможные взаимосвязи различных типов САИИ и применений имитационных исследований показаны на рис. 1.

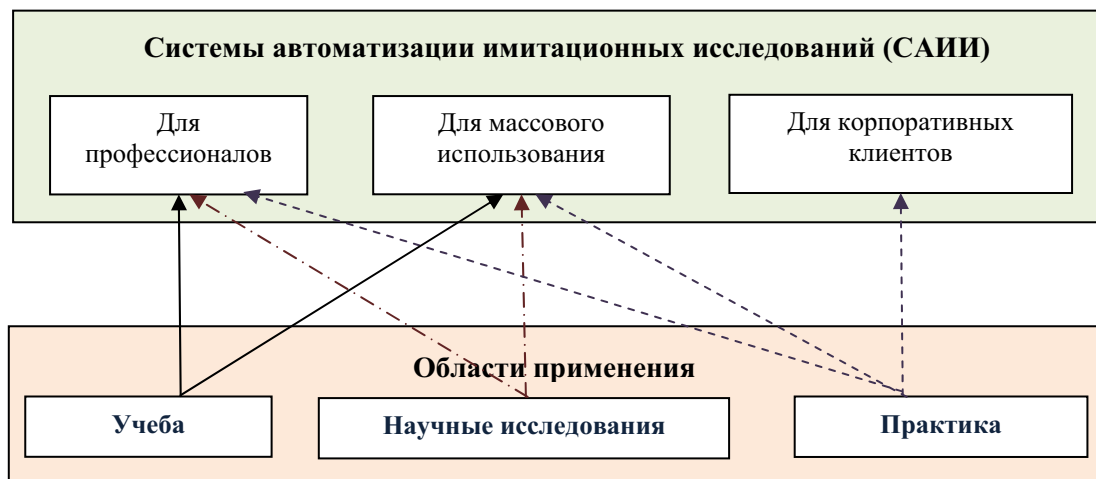


Рис. 1

Длительность имитационных исследований

Как показано в [8], имитационное исследование может быть представлено как дискретный процесс (S), состоящий из множества этапов (n) и состояний этапов (m):

$$[S = \{S_l^j\}], \text{ где } l = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Каждое подмножество S_l в свою очередь – это множество состояний j для l – го этапа имитационного исследования. Следовательно

$$S_l = \{S_l^j\}, \text{ где } l = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m_l} \quad (2)$$

Одним из основных количественных критериев, наряду со стоимостью, адекватностью, точностью и т.д., является время проведения исследования ($T_{им}$).

$$T_{им} = \sum_{l=1}^n T_l = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^{m_l} T_l^j, \quad (3)$$

где T_l^j время исполнения состояния l этапа j

Не учитывая состояния этапов, детализируем изменение длительности каждого этапа T_l для трех подходов проведения имитационного исследования. **Первый подход**, это «Раннее ИМ» – использование «старых» общецелевых систем ИМ (GPSS, SIMULA и др.) и различных программ обработки статистики и результатов моделирования. Этот подход еще до сих пор используется в наших вузах и на предприятиях. **Второй подход**, это «Современное ИМ» – использование современных общецелевых систем ИМ (ARENA, AnyLogic, Extend и др.). И, наконец, **третий подход**, развиваемый авторами, – использование САИИ, комплексной автоматизации большинства этапов и общецелевых систем ИМ в качестве моделирующего ядра.

За основу разбиения процесса имитационного исследования на этапы возьмем разбиение на 11 основных этапов, предложенное классиком ИМ Р.Шеноном [9]. Авторами, на основе собственного опыта и опроса коллег в мире ИМ, была проведена экспертная оценка длительности каждого из этапов и всего процесса для всех трех подходов.

Полученные усредненные результаты длительности каждого этапа и всего процесса имитационного исследования приведены на рис. 2.



Рис. 2

Если в «Раннем ИМ» определяющим в оптимизации значениями T_i являлось уменьшение времени ручных операций (T_p), проводимое исследователем (практически 95% времени исследования), то в связи с автоматизацией исполнения практически всех этапов все в большей степени приобретает значение и «компьютерная» составляющая времени, затраченного исследователем на проведение различных вычислений на каждом из этапов (T_a). Сейчас время выполнения ручных и автоматизированных операций практически выравнивается, хотя длительность ручных все еще больше. Поэтому, исключительно важно учитывать временные затраты на компьютерные вычисления. Следует также подчеркнуть, что значения T_p зависит от субъективных факторов: квалификации исследователя, его умения работать без ошибок и качественно. В уже сложившейся и используемой технологии исследования длительность ручных операций будет зависеть только от исследователя, и повлиять на эту длительность организационно-административными действиями очень сложно. Остается только один, объективно управляемый способ – постепенная и более глубокая автоматизация оставшихся ручных операций и ускорение выполнения всего комплекса программ.

На рис. 3 количественно показана тенденция изменения соотношения в $T_{ин}$ между T_p и T_a в классическом подходе и при использовании САИИ.

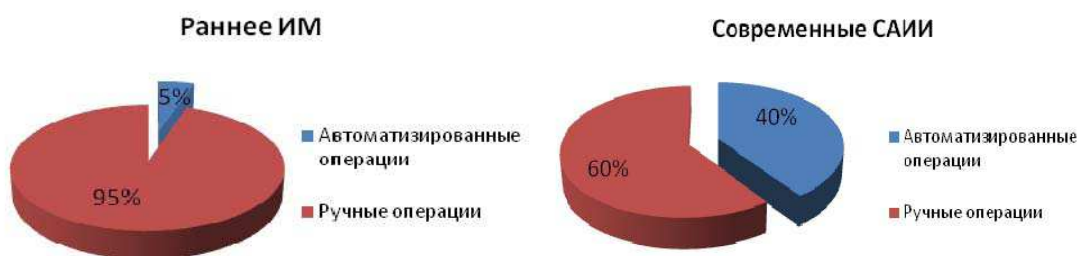


Рис. 3

Очень важным моментом является то, что в отличие от ручных операций, автоматизированные операции поддаются прямому регулированию длительности посредством повышения скорости вычислений (более производительный процессор или компьютер, количество вычислительных ядер, параллельности вычислений, большая оперативная и внешняя память и т.д.).

Вычислительная сложность имитационных исследований

Так как длительность автоматизированных операций стала значительной, то значимой стала и задача минимизации этой длительности. Вычислительная сложность имитационного исследования $S_{им}$ определяется множеством факторов. Основными объективно влияющими на $S_{им}$ факторами являются сложность до модельных вычислений, сложностью вычислений при построении модели, сложность вычисления и реализации плана исследования и сложность автоматизированного документирования исследования.

Множество домодельных факторов $\{V_{дм}\}$ – это автоматизированное исполнение постановки задачи исследования, сбора и обработки данных, способов передачи их в модель и т.д. Множество модельных факторов $\{V_{м}\}$ – это объем модели, ее алгоритмический уровень, степень детализации, выбранная единица модельного времени, период моделирования и т.д. Множество факторов эксперимента $\{V_{эк}\}$ – это количество одиночных и серий экспериментов, степень детализации сбора результатов при мониторинге эксперимента, использование оптимизирующих алгоритмов, способы представления результатов эксперимента (графика, анимация и т.д.), структура хранения результатов моделирования и т.д. Множество факторов документирования $\{V_{ду}\}$ – это вариация способов автоматического сохранения результатов в виде документов общедоступных офисных систем и средства редактирования отчета.

В итоге вычислительную сложность исследования можно представить как функцию от множества факторов:

$$S_{им} = F(\{V_{дм}\}, \{V_{м}\}, \{V_{эк}\}, \{V_{ду}\}). \quad (4)$$

Для получения количественных оценок требуемой вычислительной мощности при проведении имитационных исследований нужно подробно рассмотреть каждое из этих четырех множеств факторов. Но, учитывая ограничения по объему статьи, рассмотрим более подробно множество $\{V_{пи}\}$, так как оно на наш взгляд наиболее влияет на общую вычислительную сложность исследования. Данное множество факторов возникает на этапах планирования и проведения экспериментов с моделью S7, S8, и S9. Модель на этом этапе разработана, и с ней нужно проводить эксперименты. Основной количественной характеристикой, определяющей вычислительную мощность данного этапа, является время планирования и проведения всех экспериментов ($T_7 + T_8 + T_9$) с моделью. Основными составляющими этого времени являются количество серий экспериментов в исследовании ($i = 1, n$), количество экспериментов в i серии ($j = 1, i$) и время выполнения одного эксперимента с моделью $T(\varepsilon)_i^j$ в конкретной серии и эксперименте. Поэтому формулу вычисления общего времени выполнения данного этапа можно представить следующим образом:

$$T_7 + T_8 + T_9 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i T(\varepsilon)_i^j, \quad (5)$$

где $T(\varepsilon)_i^j$ время выполнения i эксперимента, i серии.

Практика проведения исследований показывает, что значения n и m_i могут быть достаточно большими. Например, в одном из проведенных нами исследований n был более 50 и m в диапазоне 10 – 15 на каждую серию. Для полного завершения исследования нам пришлось провести более 500 экспериментов. Учитывая, что сложность имитационной модели в этом исследовании была такова, что требовалось от 15 мин до нескольких часов на эксперимент (в зависимости от исходных данных) на персональном компьютере (на тот момент очень высокопроизводительном), то общая длительность вычислений на этом этапе составила более 300 ч. А это более 10 суток непрерывной

работы компьютера, т.е. вывод очевиден: для реализации исследований такой сложности требуются вычислительные ресурсы существенно превышающие возможности персонального компьютера.

В целом при проведении имитационных исследований, рассматривая все этапы, прослеживаются следующие общие тенденции существенного повышения запросов на вычислительные мощности ($S_{им}$) за счет:

- интеграции исполнения этапов имитационного исследования в рамках одной программной системы. В идеале, это получение САИИ, охватывающей все этапы имитационного исследования;
- распределения функций исполнения отдельных этапов между различными пользователями и в результате создание многопользовательских систем. Например, в САИИ для корпоративных клиентов – одни отвечают за ввод исходных данных и их точность, другие за проведение экспериментов, третьи анализируют полученные результаты;
- обеспечения распределенных вычислений в рамках глобальных систем. Это размещение некоторых сервисов, реализующих отдельные этапы исследования (например, моделирующее ядро) в сети Интернет;
- повышения простоты и доступности взаимодействия пользователя с системой на своем персональном компьютере, в основном за счет использования графики и анимации;
- создания локальных и глобальных баз данных моделей и существенное увеличение их размеров за счет детального мониторинга моделирования;
- 2D и 3D форм представления моделей и результатов.

Таким образом, с точки зрения **архитектуры построения и технологии исследования**, разработчики САИИ для получения разумного значения времени имитационного исследования $T_{им}$ должны обеспечить:

- огромную вычислительную мощность для постановки задачи исследования, разработки модели, обработки исходных данных, оперативного проведения множества экспериментов с моделью, хранения, анализа и документирования результатов моделирования. Это может быть не один, а некоторое множество компьютеров;
- оптимальную иерархию вычислений, распределенную между этими компьютерами и пользователями в рамках локальных и глобальных сетей вершиной которых может являться СУПЕР-ЭВМ.

Организация распределенных вычислений в имитационных исследованиях

Функции распределения вычислений между различными компьютерами для увеличения вычислительной мощности программных комплексов начали использоваться уже достаточно давно. Это и применение различных серверов, и создание удаленных хранилищ данных, и подключение более высокопроизводительных компьютеров (например, mainframe) и т.д. Постепенно технологии распределенных вычислений совершенствовалась. В ИМ они тоже используются достаточно давно. Уже появились не только системы ИМ, использующие эти технологии, но и ряд международных стандартов, например, стандарт HLA [10].

В нашей практике имитационных исследований программная реализация распределенных вычислений стала реализовываться несколько лет назад и к настоящему времени подтвердилась эффективность этого подхода. Их применение позволило реально снизить общее время имитационного исследования, понизить программные и технические требования к персональным компьютерам пользователей. Среди разрабо-

танных нами программных средств и алгоритмов, реализующих распределенные вычисления, можно выделить такие новые элементы технологии построения САИИ, как сервер GPSS и системная шина моделирования.

Сервер GPSS обеспечивает и планирует функции удаленного использования одной или нескольких копий GPSS World рядом пользователей как в локальной сети, так и в сети Интернет. Он использовался уже в целом ряде имитационных приложений и позволил решить две важные задачи: вынести «моделирующее ядро» на более высокопроизводительный компьютер (сократив длительность эксперимента с моделью $T(\varepsilon)_i^j$) и уменьшить число приобретаемых Заказчиком лицензий (снизив благодаря этому стоимость имитационного исследования). Схема распределения вычислений и взаимодействия пользователей с сервером показаны на рис. 4.

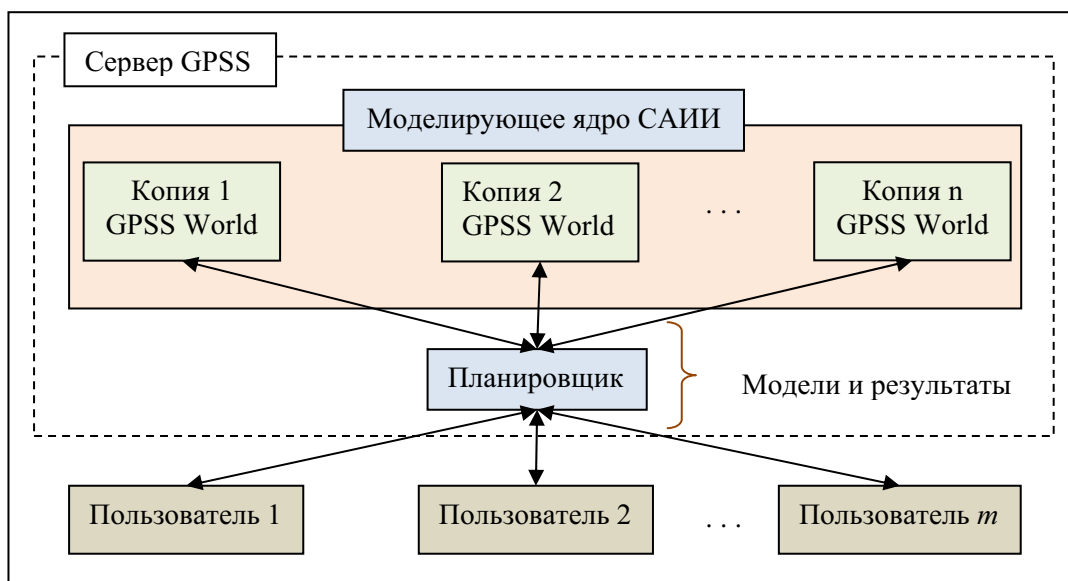


Рис. 4

Следующим практическим шагом стало создание **системной шины моделирования**. Шина, основанная на сервис – ориентированной архитектуре, позволяет обеспечить при разработке и эксплуатации САИИ быстрое и эффективное подключение различных программных сервисов и служб, созданных на различных языках программирования и даже для различных программных и аппаратных платформ. Данная программа также была успешно апробирована при разработке практических имитационных приложений. В самом общем виде архитектура системной шины моделирования показана на рис. 5.

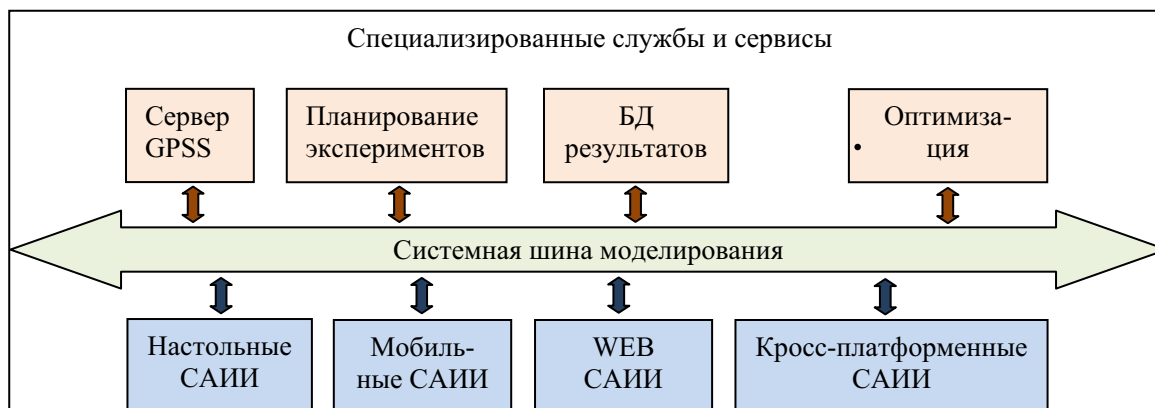


Рис. 5

Приведенная выше архитектура является упрощенной реализацией «вычислений по требованию» облачного моделирования. Интерфейсом облачного САИИ служит системная шина моделирования. Она является связующим звеном между клиентской частью и другими частями САИИ в облачной среде. Все САИИ являются облачными в том смысле, что полный свой функционал по проведению имитационных исследований реализуют только при «подключении» к облаку. Под клиентской частью здесь понимаются различные вычислительные устройства и программы служащие непосредственным инструментом пользователя (то, что он держит в руках) при проведении имитационного исследования. По типу клиентской (пользовательской) части все САИИ можно разбить на «Классические» для настольных ПК и ноутбуков, «Мобильные» для интернет-планшетов, «WEB» реализованные в виде веб-приложений и «Кросс-платформенные».

Ближайшей перспективой в развитии технологий и иерархии имитационных вычислений являются следующие задачи:

- Совершенствование архитектуры высокопроизводительных вычислений. Разработка не упрощенной, а полноценной архитектуры облачного моделирования. Такой проект уже начат и носит условное название GPSS Cloud.
- Практический перенос наиболее сложных сервисов и служб на более мощный вычислительный ресурс – СУПЕР ЭВМ. Тем более, что создаваемые сейчас мощные вычислительные кластеры в ведущих университетах страны и Российской академии наук не загружены, а реальная потребность в вычислительных ресурсах при проведении имитационных исследований очевидна.
- И наоборот, упрощение и перенос клиентской части на более удобные, простые и мобильные вычислительные устройства. Например, планшеты.
- Создание на основе концепции GPSS Cloud виртуальных лабораторий для проведения имитационных исследований и хранения результатов.

Литература

1. **Козлов А. Н., Девятков Т. В., Кейер П. А.** Исследование функционирования центра коллективной обработки информации методом имитационного моделирования // III Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2007 г.): Сб. докладов. Т. 2. С. 96–100.
2. **Власов С. А., Девятков В. В., Усанов Д. И.** Использование имитационных моделей для оценки производственной мощности при управлении металлургическим производством // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 8–13.
3. **Alexandrov V., Sikachev V.** Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems // Proc. of the Ninth Intern. Conf., Minsk, Sept. 7–11, 2010. Minsk: Publ. Center of BSU, 2010. Vol. 2. P. 88–91.
4. **Ковалев В. С., Усанов Д. И., Цуцков Д. В., Калинин С. В.** Укрупненная модель железнодорожного направления // III Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2007 г.): Сб. докладов. Т. 2. С. 96–100.
5. **Власов С. А., Девятков В. В., Самойлов В. В.** Имитационное исследование системы сервисного обслуживания программно-технических средств ОАО «Татнефть» // Автоматизация в промышленности. 2007. № 4. С. 11–14.
6. **Власов С. А., Девятков В. В., Девятков Т. В.** Язык моделирования GPSS World и системы автоматизации имитационных исследований: опыт применения и перспективы использования // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Ими-

- тационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2009 г.): Сб. докладов. Т. 1. С. 11–18.
7. **Девятков В. В.** Мир имитационного моделирования: взгляд из России // Прикладная информатика. 2011. № 4. С. 9–29.
 8. **Девятков Т. В.** Некоторые вопросы создания систем автоматизации имитационных исследований // Прикладная информатика. 2010. № 5(29). С. 102–116.
 9. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука // Пер. с английского. М.: Мир, 1978. 418 с.
 10. IEEE 1516-2010 – Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture – Framework and Rules