

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИМИТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

---

*Девятков В.В. Развитие методологии и технологии имитационных исследований сложных систем.*

**Аннотация.** В данной статье предлагается усовершенствованная методология и технология имитационных исследований сложных систем, как результат развития и совершенствования традиционной методологии. Основным отличием усовершенствованной методологии является последовательная автоматизация процесса исследования и интеграция всех программ в единый комплекс. Программные комплексы, создаваемые на основе данной методологии, позволили в среднем сократить в несколько раз время проведения исследования сложных систем и значительно увеличить круг потенциальных пользователей имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, методология имитационных исследований, концепция состояний и этапов, концепция программ.

*Devyatkov V.V. The Development of Methodology and Technology of Simulation Studies of Complex Systems.*

**Abstract.** In this paper we propose an improved methodology and technology of simulation studies of complex systems as a result of development and improvement of the traditional methodology. The main difference is the improved methodology consistent automation of the process of research and the integration of all programs in a single complex. Software systems that are created on the basis of this methodology allowed an average cut several times during the study of complex systems and significantly increase the number of potential users of simulation.

**Keywords:** simulation, methodology for simulation studies, the concept of states and stages, the concept of program.

---

**1. Введение.** Традиционная методология проведения процесса имитационного исследования сложных систем (далее ИИСС) представляет собой последовательную реализацию множества этапов, которые должен выполнить исследователь. Методология ИИСС детально описана классиками имитационного моделирования (далее ИМ) Н.П. Бусленко, Т. Нейлором и Р. Шенноном [1-3]. На рисунке 1 показана структура проведения имитационного исследования, предлагаемая Р. Шенноном, это последовательное выполнение 11 этапов. Современные исследователи, как правило, используют именно эти этапы [4, 5], меняются в основном только их названия. Например, первый этап чаще всего называется «Постановка задачи», второй этап - «Сбор данных» и т.д.

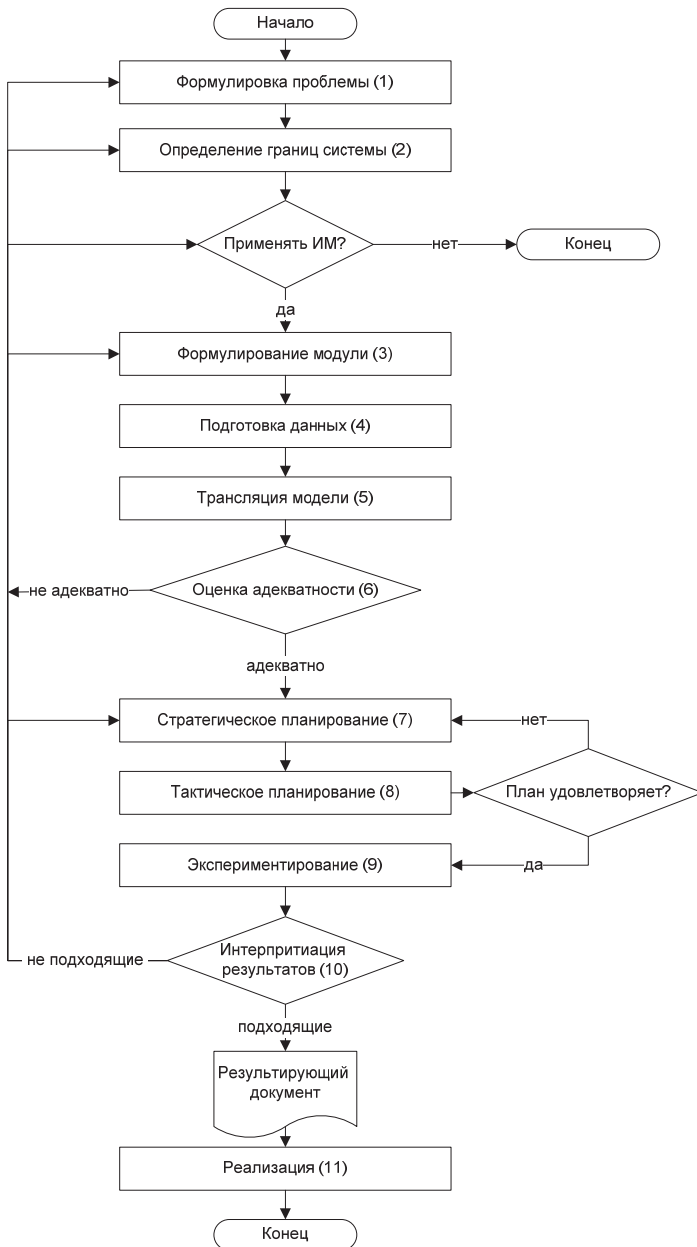


Рис. 1 Структура процесса проведения имитационного моделирования

На момент создания традиционной методологии, более 40 лет назад, большинство действий и операций выполнялись исследователем вручную. И только небольшая их часть (этапы 3, 4, 5 и 9) была частично автоматизирована в рамках первых языков ИМ. В связи с последующей объективной необходимостью автоматизации процесса ИИСС, появлением новых теоретических методов и алгоритмов сам процесс ИИСС становился все более сложной системой и требовал детального изучения и совершенствования [6, 7]. Наряду с очевидной структурой процесса ИИСС, показанной на рисунке 1, существует еще целый ряд элементов, связей и воздействий, которые не влияли на эффективность ручного проведения исследования, но стали определяющими факторами в условиях автоматизации процесса ИИСС. Эти факторы необходимо описать, понять их причинно-следственные связи с процессом ИИСС и найти способы повышения эффективности всего исследования в целом.

Представим традиционный процесс ИИСС ( $S$ ) формально в виде совокупности функционально зависящих и взаимодействующих друг с другом множеств – целей, этапов, состояний этапов, их взаимосвязей, ручных и автоматизированных управляющих воздействий и показателей функционирования моделируемой системы.

$$S = ((C_i), (S_i), (S_i^j), (Q_i), (Q_i^j), (U_{pi}^j), (U_{npi}^j), (П_i), (П_i^j)), \quad (1)$$

где,  $i=(1, \dots, n)$  – количество этапов процесса ИИСС,  $j=(1, \dots, m_i)$  количество состояний  $i$ -го этапа.

Все указанные в формуле (1) множества являются разнородными и сложно формализуемыми, но исключительно важными для представления и понимания сути исследования. Процесс ИИСС всегда имеет определенные цели и задачи этапов ( $C_i$ ), иначе проведение исследования бессмысленно. Структурно, любое имитационное исследование состоит из обязательных для исполнения этапов ( $S_i$ ), показанных на рисунке 1 и входящих в них более детальных действий и операций – состояний этапов ( $S_i^j$ ). Связь этапов и состояний этапов между собой отображена во множествах ( $Q_i$ ) и ( $Q_i^j$ ), которые при конкретной реализации описываются матрицами смежности или иерархическими структурами. Процесс ИИСС итеративен и является системой с обратной связью. Непосредственным участником процесса является исследователь, который управляет посредством ручных ( $U_{pi}^j$ ) или автоматизированных и автоматических ( $U_{npi}^j$ ) воздействий. Ручное воздействие – это вмешательство исследователя в процесс ИИСС без применения программных средств. Автоматизированное воздействие это

вмешательство исследователя в процесс ИИСС интерактивными средствами той или иной программной среды. Автоматическое воздействие - это вмешательство в процесс ИИСС без участия исследователя, возникающее в соответствии с заложенной разработчиком логикой работы программных средств. Для анализа качества и эффективности поведения исследуемой системы всегда формулируются показатели функционирования процесса ИИСС, его этапов и состояний - множества  $(P_i)$  и  $(P_i^j)$ . Характеристики указанных выше множеств могут изменяться от исследуемой системы, условий проведения исследования, знаний и предпочтений исследователя, его квалификации и ряда других факторов.

С момента возникновения и до настоящего времени, ввиду сложности применения, ИМ было доступно только профессионалам, в основном это были ученые. До сих пор актуально меткое определение Р. Шеннона, вынесенное в название его книги - *«Имитационное моделирование систем - искусство и наука»*.

В связи с непрерывным усложнением окружающих нас систем практический интерес к имитационным исследованиям неуклонно возрастает [8, 9]. По нашим оценкам ежегодно, только в России, требуют исследования сотни тысяч сложных систем, и выполнить их только силами профессионалов их невозможно. У государства и бизнеса есть необходимость и желание воспользоваться ИМ, но нет практических инструментальных средств, чтобы сделать это быстро, просто и за разумные средства.

Имеющийся у автора опыт построения моделей многих сложных систем и проведения с их использованием исследований показывает, что необходимы, и самое главное возможны, изменения в организации и технологиях проведения процесса ИИСС. В результате должны быть созданы более совершенные инструментальные программные средства ИМ, с которыми мог бы работать более широкий круг исследователей. Например, любой специалист с инженерным уровнем образования.

**2. Эволюция и совершенствование традиционного процесса ИИСС.** Для проведения ИИСС в мире разработано и успешно используется большое количество самых разнообразных программных средств, которые можно использовать при автоматизации моделирования (рисунок 2). Например, это различные системы: для структурированного описания систем с использованием стандартов - IDF, UML и BPMN представлений; для статистической обработки исходных данных и результатов – ППП СТАТИСТИКА, система SAS, Stat::FIT, StatGraphics и т.д.; десятки языков имитационного

моделирования для создания модели и проведения экспериментов – GPSS World, AnyLogic, Extend, SIMIO и т.д.; ряд систем оптимизации параметров исследуемых систем - OptQuest, IOSO и другие программные средства реализации этапов ИИСС. Часть этих программ создана специально для моделирования, но большинство разрабатывалась для других применений и в процессе ИИСС используется только некоторые функции программы. Наличие этих программ большой плюс для исследования, но все эти программы необходимо применять в рамках единого процесса исследования, реализующего последовательно один этап за другим. Наиболее сложным и длительным для исследователя является передача, в соответствии с технологией, результатов выполнения одной программы на вход другой программы. Это требует введение множества ручных подготовительных операций.

В настоящее время одним из основных и определяющих факторов успешного проведения процесса ИИСС является выбор исследователем совокупности программных средств, реализующих цели и задачи исследования.

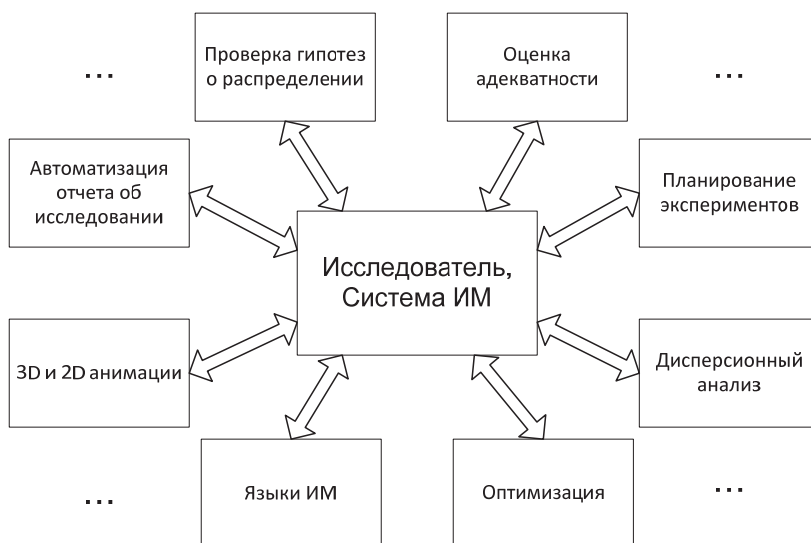


Рис. 2. Программы автоматизации действий исследователя при проведении ИИСС

Каждый язык моделирования или дополнительная программа, используемая в комплексном или автономном режиме, содержат свой набор программных компонент, связей, диалогов и формируемых в

модели показателей функционирования системы. Обозначим через  $Tech_s^i$ , совокупность множеств, представляющих конкретные программные технологии, которые используются для реализации состояний процесса ИИСС на  $i$ -ом этапе:  $Tech_s^i = ((S_i^j), (Q_i^j), (U_i^j), (U_{pi}^j), (Pi_i^j))$ . Тогда, с учетом оставшихся ручных операций (задание целей, формирование показателей, передача результатов одного из этапов в качестве исходных данных на другой этап), формула (1) примет следующий вид:

$$S = ((C_i), (S_i), (Q_i), (U_{pi}), (Tech_s^i), (Pi_i)). \quad (2)$$

Далее автором было проведено детальное исследование изменений, которые произошли в традиционном процессе проведения ИИСС с момента его возникновения и по настоящее время [10, 11].

В результате были выделены следующие основные направления и тенденции эволюции традиционного подхода к проведению ИИСС:

1. Идет последовательная автоматизация ручных операций и действий исследователя на всех этапах ИИСС посредством создания новых программ.

2. Непрерывно совершенствуются ранее созданные программные средства с целью улучшения их функциональных свойств, повышения скорости вычислений и упрощения интерфейса пользователя.

3. Происходят значительные структурные изменения процесса ИИСС – некоторые этапы исчезают, появляются новые этапы, совершенствуются или объединяются существующие этапы и т.д.

4. Современные программные технологии позволяют при построении очень сложных моделей применять методы и технологии коллективной работы над одним исследованием. Например, за ввод данных отвечают одна группа исследователей, за эксперименты – вторая, за анализ и интерпретацию результатов – третья.

5. Во многих программных системах активно используются современные методы распределения вычислений (например, облачные технологии) в процессе проведения ИИСС между компьютерами различной мощности. В частности, этап «Экспериментирование» переводится на высокопроизводительные сервера (и даже СУПЕР ЭВМ), а действия на всех этапах по диалоговому взаимодействию с пользователем – на персональные и мобильные устройства (планшеты, смартфоны и др.).

Несмотря на такие глубинные изменения, методологическая основа проведения имитационного исследования осталась прежней и базируется на традиционном подходе и концепции автономных

«Этапов и состояний». При этом не в полной мере учитываются возможности современных информационных технологий по комплексированию программ и данных. В результате при проведении ИИСС приходится искусственно водить множество ручных операций для «стыковки» этапов, отсутствует единая база данных моделей и результатов. При этом каждый исследователь часть операций по интеграции исследования выполняет самостоятельно.

Все это приводит к неэффективному проведению процесса ИИСС:

Во-первых, это длительные сроки исследования ( $T_{ин}$ ). Время исследования в процессе эволюции удалось в среднем снизить с шести до трех месяцев, тем не менее, оно остается недопустимо большим. Это не устраивает большинство потенциальных пользователей. Как показал анализ, значительные резервы для уменьшения  $T_{ин}$  есть. В основном  $T_{ин}$  увеличивается при выполнении ручных операций, связывающих соседние в процессе ИИСС этапы.

Во-вторых, сложность использования метода ИМ из-за завышенных требований к квалификации исследователя. Исследователь должен знать методологию исследования, обладать компетенцией в области статистики, планирования экспериментов, оптимизации и ряде других наук, он должен уметь использовать различные программы для проведения процессе ИИСС и т.д. В результате от создания модели и проведения исследования оторваны самые заинтересованные лица – руководители, системные аналитики и инженеры Заказчика.

Таким образом по результатам детального анализа был сделан вывод, что проводить исследование существующими программными средствами в рамках традиционного подхода к ИМ становится все сложнее и очевидный потенциал увеличения практических применений моделирования не может быть в полной мере реализован. Поэтому, наряду с полной автоматизацией и совершенствованием отдельных программ, необходимы концептуальные изменения при проведении ИИСС. При этом должны использоваться самые современные информационные технологии [12, 13]. Итоговым результатом должна стать более совершенная методология проведения ИИСС и возможность создания на ее основе удобной и простой программной технологии ИМ для массового применения.

### **3. Развитие традиционной методологии проведения ИИСС.**

В качестве основного направления совершенствования процесса ИИСС был выбран последовательный уход от ручных операций и объединение всех используемых программ в единый программный

комплекс. При объединении, наряду с уже имеющимся функциями программ, необходимо было предусмотреть возможность создания общих для всех этапов баз данных моделей, исходных данных и результатов. Кроме этого требовалось создать средства для проектирования простого и удобного языка взаимодействия исследователя с моделью, настраиваемого на предметную область каждой создаваемой модели.

В результате в традиционную методологию проведения процесса ИИСС были внесены существенные изменения [14], направленные на систематизацию и объединение всех эволюционных изменений в рамках единой концепции и создание программных спецификаций для массового создания имитационных приложений. Основным постулатом при разработке методологии был переход от концепции «Этапов и состояний» к концепции «Программ и технологий вычислений».

В результате процесс ИИСС был представлен в виде парадигмы, изображенной на рисунке 3.

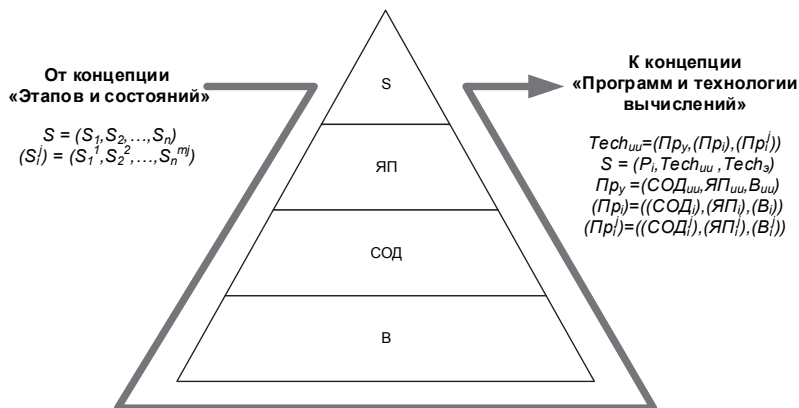


Рис. 3. Парадигма имитационного исследования

Парадигма состоит из четырех, взаимодополняющих абстрактных уровней:

- структурно-функциональный уровень – S;
- язык взаимодействия исследователя с программами – ЯП (язык пользователя);
- уровень данных – СОД (система обработки данных процесса ИИСС);
- архитектура организации и проведения вычислений – В.



Как показано на рисунке 3 в концепции «Программ и технологии вычислений» были введены формальные обозначения множеств программ, реализующих общее управление процессом ИИСС ( $Pr_y$ ), функции этапов ( $Pr_i$ ) и их состояний ( $Pr_i^j$ ).

В результате было сформулировано понятие общей программной технологии проведения исследования  $Tech_{ин}=(Pr_y, (Pr_i), (Pr_i^j))$  и выделено множество оставшихся ручных операций ( $P_i$ ).

В итоге процесс проведения ИИСС в рамках усовершенствованной методологии был представлен в следующем виде.

$$S = (P_i, Tech_{ин}, Tech_э), \quad (3)$$

где,  $i=(1, \dots, n)$  – новые видоизмененные этапы.

Введение программных технологий  $Tech_{ин}$  и  $Tech_э$  позволило осуществить переход от ряда неструктурированных, разнородных множеств и соответствующего им вербального описания - к программам, которые могут быть структурированы, алгоритмически описаны и технологически реализованы (формула 3). Для формального описания программ, структур данных имеются различные методы и средства теории программирования и вычислений. Поэтому, при создании конкретного инструментального средства ИМ в рамках усовершенствованной методологии, переход от концептуального описания к программным спецификациям является чисто технологическим процессом.

Основным связующим звеном процесса проведения и управления ИИСС при новом подходе является интегрированная программная технология.

**Определение.** Интегрированная программная технология  $Tech_{ин}$  это совокупность правил и принципов объединения программ, обеспечивающие исполнение следующих возможных действий и операций при проведении процесса ИИСС:

1) Формирование общей цели, задач и показателей для всего исследования и локальных задач и показателей для отдельных этапов.

2) Автоматизированный ввод и обработка управляющих воздействий исследователя (команд и данных) интегрирующих каждый отдельный этап в процесс ИИСС.

3) Централизованное накопление, сохранение, и обработка исходных данных и результатов, необходимых для реализации отдельных этапов и всего процесса ИИСС.

4) Оперативный интерактивный анализ экспериментов и серий экспериментов с моделью.

5) Обобщение результатов и выработка рекомендаций на каждом этапе и по итогам проведения всего процесса ИИСС.

6) Автоматизированное оформление отчета об исследовании.

Необходимо отметить, что *Tech<sub>int</sub>* при реализации конкретного инструментального средства ИМ может включать не все указанные действия и операции. Это зависит от текущего уровня автоматизации и интеграции процесса ИИСС в используемой системе ИМ. Кроме выбранной программной технологии на характеристики процесса ИИСС влияют архитектура вычислений, уровень используемых информационных технологий и качество программной и методической реализации этих операций.

**4. Практическое применение усовершенствованной методологии.** Конкретную программную реализацию с использованием данной методологии будем называть системой автоматизации имитационных исследований (САИИ).

В приведенных ниже примерах создания САИИ при реализации в качестве базовой системы ИМ использовался язык GPSS World. Хотя в целом это непринципиально, так как методология не привязана ни к одной из существующих систем моделирования. Выбор GPSS World обусловлен предпочтениями автора, возможностями языка и практикой моделирования на нем по всему миру.

Сначала был создан САИИ для профессионалов - расширенный редактор GPSS World.

В самом общем виде основные преимущества реализованных в редакторе решений сформулируем следующим образом. Исследователь в процессе ИИСС может:

1. Осуществлять общее управление исследованием (моделями, экспериментами и результатами), используя специально созданную структуру данных, которая ему привычна, понятна и удобна. Это библиотека с иерархией «проект – модели – эксперименты – отчеты».

2. Начинать разработку модели с формулирования проблемы, посредством создания иерархической графической структурной схемы модели, которая конструируется исследователем из библиотеки ранее созданных типовых элементарных блоков.

3. Осуществлять автоматическую генерацию и сборку текста модели по созданной структурной схеме и введенным исходным данным.

4. Создавать в новом текстовом редакторе модель, используя автовыворачивание, подсветку синтаксиса, контекстные подсказки «на лету», дополнительный синтаксический анализ, группировку и т.д.

5. Более эффективно и быстро, чем стандартными средствами GPSS World, отлаживать модели при помощи мощнейшего интерактивного отладчика, позволяющего визуально отслеживать не только продвижение транзактов, но и изменение при этом состояния и значений других объектов в модели.

6. Проектировать формы ввода исходных данных и подготовки серий экспериментов на основе созданной модели. Каждая форма – это совокупность простых и удобных программных диалогов по заданию параметров моделируемой системы с использованием языка предметной области разрабатываемой модели.

7. Конструировать интерактивные формы анализа результатов моделирования. В результате профессионал получает мощнейший инструмент, позволяющий отобразить все необходимые показатели модели.

8. Выбрать факторы и показатели для данной модели, которые будут участвовать в серии экспериментов. Задать один из возможных методов планирования экспериментов и автоматически сформировать план экспериментов.

9. Выполнить одиночный эксперимент с моделью, либо провести серию экспериментов по сформированному плану.

10. Визуализировать ход выполнения любого эксперимента в динамике, в том числе и в анимированном графическом виде.

11. Осуществить сравнительный интерактивный анализ результатов экспериментов и серий экспериментов, сохранять полученные результаты в общем хранилище данных.

12. Автоматически формировать, дополнять вручную и распечатывать результирующий исследование документ (отчет), включающий любые полученные результаты моделирования.

13. Обеспечить удаленную (сетевую) работу с одной или несколькими копиями системы GPSS World.

Необходимо отметить, что новые возможности расширенного редактора, предоставляемые пользователю, никоим образом не изменяют спецификации языка моделирования. Тексты моделей на языке GPSS World, написанные ранее, будут полностью совместимы с новым редактором. Пример формы вывода результатов, созданной с использованием технологии массовой разработки приложений, приведен на рисунке 4.

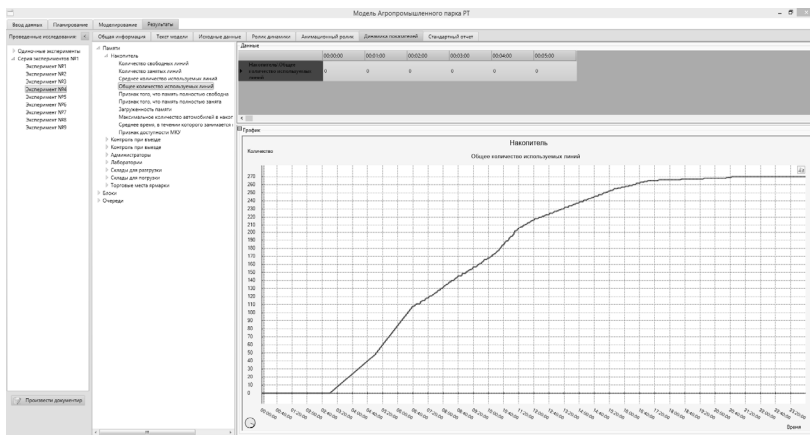


Рис. 4. Форма вывода динамических результатов в САИИ

Расширенный редактор стал базисом для создания технологии массового создания САИИ в различных предметных областях. Суть технологии заключается в создании предметно-ориентированных библиотек типовых элементарных блоков, базисных конструкций языка пользователя в виде шаблонов форм ввода данных и анализа результатов. В итоге исследователь создает имитационные модели, подобно детскому конструктору «лего» из имеющихся блоков.

**5. Заключение.** Усовершенствованная методология была апробирована автором при проведении целого ряда практических имитационных исследований: выбор наилучших транспортно-логистических решений при проектировании Агрпромышленного парка Республики Татарстан, оценка и анализ пропускной и провозной способности железнодорожных участков и направлений для ОАО РЖД, выработка практических рекомендаций при проектировании технологии судосборочных производств в сухих доках и т.д.

Одним из наших наиболее значимых примеров практического внедрения методологии и технологии массового создания САИИ стал проект исследования транспортной системы Универсиады 203 года в Казани. За несколько месяцев было разработано более 60 моделей для исследования транспортной инфраструктуры различных спортивных объектов и движения клиентских маршрутов Универсиады по городу. По результатам имитационного исследования были предоставлены количественно рассчитанные и обоснованные рекомендации по транспортным схемам и управлению движением для ГИБДД и список особо загруженных участков дорог, въездов на объекты, парковки, на которых необходимо было особо тщательно вести постоянный

мониторинг и контроль над потоками транспорта Универсиады. Все рекомендации были учтены при проведении самой Универсиады. В итоге транспортная система во время Универсиады работала без сбоев, очередей и задержек. Необходимость, своевременность и качество проведенного нами системного анализа признано федерацией студенческого спорта (FISU), правительствами России и Татарстана.

Таким образом принципиальным преимуществом усовершенствованной методологии и новой программной технологии является возможность создание интегрированного и эффективного программного комплекса для реализации полного цикла процесса проведения ИИСС. Внедрение усовершенствованной технологии показало, что происходит сокращение времени проведения исследования, в среднем с трех месяцев до нескольких недель. При этом исследование по существу превращается в имитационную экспертизу, которая гарантированно дает количественные оценки и рекомендации по совершенствованию системы за допустимое для заказчика время.

### Литература

1. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем // М.: Наука. 1978. 400 с.
2. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с английского // М.: Мир. 1978. 418 с.
3. *Нейлор Т.* Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / пер. с английского // М.: Мир. 1975. 500 с.
4. *Balci O.* A Life Cycle for Modeling and Simulation // *Simulation*. 2012. Vol. 88(7). pp. 870–883.
5. *Толуев Ю.И.* Стандартные этапы создания имитационных моделей производственных и логистических систем // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. Казань: Изд-во ФЭН Академии наук РТ. 2013. Том 1. С. 80–89
6. *Tolk A., Turnitsa C.* Conceptual modeling with processes // *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC*. 2012. pp. 2641–2653.
7. *Wainer G. A.* Discrete-Event Modeling and Simulation: A Practitioner's Approach // CRC Press. 2009. 520 p.
8. *Ross S. M.* Simulation (Fifth edition) // Academic Press. 2012. 328 p.
9. *Tolk A., Diallo S.Y., Padilla J.J.* Semiotics, Entropy, and Interoperability of Simulation Systems – Mathematical Foundations of M&S Standardization // *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC*. 2012. pp. 2751–2762.
10. *Heath B.L., Ciarallo Hill R.R.* Validation in the Agent-based Modeling Paradigm: Problems and a Solution // *Simulation and Process Modeling*. 2012. 7 (4). pp. 229–239.
11. *Bauer K., Schneider K.* Predicting Events for the Simulation of Hybrid Systems // *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer and Information (CIT 2010)*. pp. 1833–1840.
12. *Guizzardi G., Wagner G.* Towards an Ontological Foundation of Discrete Event Simulation // *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC*. 2010. pp. 652–664.
13. *Furht B., Escalante A.* Handbook of Cloud Computing // Springer. 2010. 634 p.

14. *Десятков В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: монография // М.: Вузовский учебник.: ИНФРА-М. 2013. 448 с.*

## References

1. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnyh sistem* [Simulation complex systems]. М.: Nauka. 1978. 400 p. (In Russ.).
2. Shannon R. *Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [System simulation – art and science]. М.: Mir. 1978. 418 p. (In Russ.).
3. Naylor T. *Mashinnye imitacionnye jeksperimenty s modeljami jekonomicheskikh sistem* [Computer simulation experiments with models of economic systems]. М.: Mir. 1975. 500 p. (In Russ.).
4. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation. *Simulation*. 2012. vol. 88(7). pp. 870–883.
5. Toluev U.I. [Standard steps for creating simulation models of production and logistic systems]. *Materialy shestoj vserosijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika» IMMOD-2013* [Proceedings of the Sixth Russian scientific and practical conference «Simulation. Theory and Practice IMMOD 2013»]. Kazan: FEN Tatarstan Academy of Sciences. 2013. vol. 1. pp. 80–89. (In Russ.).
6. Tolk A., Turnitsa C. Conceptual modeling with processes // *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC. 2012. pp. 2641–2653.*
7. Wainer G. A. *Discrete-Event Modeling and Simulation: A Practitioner's Approach*. CRC Press. 2009. 520 p.
8. Ross S. M. *Simulation* (Fifth edition). Academic Press. 2012. 328 p.
9. Tolk A., Diallo S.Y., Padilla J.J. Semiotics, Entropy, and Interoperability of Simulation Systems – Mathematical Foundations of M&S Standardization. *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC. 2012. pp. 2751–2762.*
10. Heath B.L., Ciarallo F.W., Hill R.R. Validation in the Agent-based Modeling Paradigm: Problems and a Solution. *Simulation and Process Modeling*. 2012. vol. 7(4). pp. 229–239.
11. Bauer K., Schneider K. Predicting Events for the Simulation of Hybrid Systems. *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer and Information (CIT 2010)*. pp. 1833–1840.
12. Guizzardi G., Wagner G. Towards an Ontological Foundation of Discrete Event Simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference. WSC. 2010. pp. 652–664.*
13. Furht B., Escalante A. *Handbook of Cloud Computing*. Springer. 2010. 634 p.
14. Devyatkov V.V. *Metodologija i tehnologija imitacionnyh issledovanij slozhnyh sistem: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija: monografija* [Methodology and technology of simulation studies of economic systems: current state and prospects: monograph]. М.: Vuzovsky uchebnic.: INFRA-M. 2013. 448 p. (In Russ.).

**Десятков Владимир Васильевич** — к-т техн. наук, заместитель директора по науке, Институт информатики Академии наук Республики Татарстан. Область научных интересов: информатика, системный анализ, имитационное моделирование. Число научных публикаций — 73. vladimir@elina-computer.ru; 420111 Казань, ул. Левобулачная, д. 36а; р.т. +7 843 292-38-67, факс +7 843 292-39-05.

**Devyatkov Vladimir Vasil'evich** — Ph.D., Deputy director for science, Institute of Computer Science Tatarstan Academy of Science. Scientific interests: informatics, system analysis, simulation modeling. The number of publications — 73. vladimir@elina-computer.ru; Levobulachnay str., 36a, Kazan, Russian Federation 420015; office phone +7 843 292-38-67, fax +7 843 292-39-05.

## РЕФЕРАТ

### *Десятков В.В.* **Развитие методологии и технологии имитационных исследований сложных систем.**

В статье рассматриваются вопросы методологического обеспечения имитационных исследований сложных систем. Анализируется традиционный подход к имитационным исследованиям. Выделен основной недостаток традиционного подхода – ориентация на устаревшие программные технологии. Это сдерживает создание инструментальных средств имитационных исследований для массового применения.

Показано, что требуется совершенствование традиционной методологии с учетом возможностей современных информационных технологий. В связи с этим введена новая парадигма, описывающая процесс имитационных исследований и состоящая из четырех абстрактных уровней (структуры, языка пользователя, структуры данных и организации вычислений).

Это позволило сформулировать концепции и принципы новой методологии имитационных исследований, а также разработать концептуальные модели систем автоматизации имитационных исследований для различных применений.

В статье приведены примеры реализации имитационного приложения, разработанного с использованием новой методологии.

## SUMMARY

### *Devyatkov V.V.* **The development of methodology and technology of simulation studies of complex systems.**

This article discusses the methodological support of simulation studies of complex systems. Analyzes the traditional approach to simulation studies. Highlighted the main drawback of the traditional approach - focus on the latest software technology. It retards the development of simulation tools for the study of mass application.

It is shown that is necessary to improve the traditional methodology, taking into account the capabilities of modern information technology. In this regard, a new paradigm was introduced describing the process of simulation studies and consists of four abstract levels (structure, the user's language, data structures and organization of computing).

It is possible to formulate the concepts and principles of a new methodology for simulation studies, as well as to create a conceptual model of automation systems simulation studies for various applications.

The article gives examples of simulation applications developed using the new methodology.