

УДК 519.876.5+681.518.5+656.25

ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: at-tanya@mail.ru
ЛЫКОВ Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: bastdrew@mail.ru
МАРКОВ Дмитрий Спиридонович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru
НАСЕДКИН Олег Андреевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: nasedkin@crtc.spb.ru
СОКОЛОВ Вадим Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: SVB9@yandex.ru

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

Целью данной статьи является обобщение опыта и формирование понятийного аппарата имитационного моделирования в области исследования и обоснования системотехнических решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Для решения поставленной задачи использованы системный подход и формализация основных положений и проблем имитационного моделирования на системотехническом уровне. Сформулированы термины и определения, в совокупности образующие понятийный аппарат в рассматриваемой предметной области. На основе введенного понятийного аппарата предложена технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на системном уровне. Указано, что имитационная модель сложной системы сама является сложной системой со своим жизненным циклом, представленным в виде предложенной технологии моделирования. В качестве основной проблемы применения метода имитационного моделирования выделена его неструктурированность. Для решения этой проблемы предложено использовать различные способы формализации на всех этапах жизненного цикла имитационных моделей. Предложенный понятийный аппарат обеспечивает более высокое качество коммуникативности и обучения участников решению системотехнических проблем с использованием методологии имитационного моделирования. Технология имитационного моделирования применялась и продолжает применяться на различных этапах жизненного цикла микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики; имитационная модель; жизненный цикл; понятийный аппарат; технология имитационного моделирования.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204

▼ Введение

Целесообразность применения методологии имитационного моделирования определяется как свойствами систем железнодорожной автоматики и телемеханики, так и сложностью задач, решаемых на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ). Объектом моделирования являются натурные или виртуальные объекты (например, разрабатываемая система), а именно — собственно устройства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), а также системы обеспечения их жизненного цикла (СОЖЦ). К СОЖЦ СЖАТ относятся: система доказательств безопасности и сертификации СЖАТ на безопасность; системы автоматизированного

проектирования и электронного документооборота технической документации; системы диспетчерского контроля и на их основе технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния устройств ЖАТ; системы автоматизированного управления службы сигнализации, централизации и блокировки АСУ-Ш-2, системы технической эксплуатации СЖАТ. Далее СЖАТ и СОЖЦ, если нет необходимости указывать различия, определяются как СЖАТ.

СЖАТ являются сложными системами и характеризуются следующими особенностями:

- СЖАТ совместно с объектом управления образуют сложный автоматизированный

- технологический комплекс станции, перегона, сортировочной горки, участка;
- выполнение множества технологических функций;
- выполнение функций с обеспечением контроля условий безопасности движения поездов;
- реализация СЖАТ в виде сложных аппаратно-программных комплексов;
- реализация технологических функций программными средствами;
- обеспечение защищенности от опасных отказов аппаратных, аппаратно-программных и программных средств систем;
- иерархическая структура;
- человеко-машинные системы со сложным интерфейсом;
- распределение функций по уровням иерархии и между техническими средствами и человеком-оператором;
- функционирование в реальном масштабе времени;
- территориальная распределенность устройств и подсистем;
- сложные взаимосвязи систем различных объектов управления (перегон, станция, переезд, сортировочная горка, подвижные объекты);
- большое количество разнородных элементов со сложными связями;
- долгосрочность функционирования;
- наличие большого количества иногда противоречивых нормативных документов различного статуса;
- необходимость системы технической эксплуатации, обеспечивающей поддержку работоспособного состояния систем на протяжении всего периода технологической эксплуатации;
- сложный, многоэтапный, длительный по времени ЖЦ СЖАТ;
- воздействие внешней среды, включая климатические, электромагнитные, механические, электрохимические.

Приведенные свойства СЖАТ как сложных систем определяют сложность и многоэтапность их ЖЦ. ЖЦ СЖАТ — это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов от формирования концепции

безопасности и исходных требований к устройству или системе железнодорожной автоматики и телемеханики до вывода из эксплуатации и утилизации. ЖЦ СЖАТ включает следующие основные процессы:

- разработка эксплуатационно-технических требований;
- разработка концепции безопасности и соответствующих документов;
- разработка аппаратно-программных решений и конструкторско-технической документации в виде альбомов типовых решений;
- доказательство безопасности принятых технических, программных решений и подтверждение соответствия или сертификация на безопасность;
- тиражирование — проектирование аппаратно-программных средств СЖАТ для конкретных объектов железнодорожного транспорта и их изготовление по заказным спецификациям проекта;
- выполнение по проекту строительных, монтажных и пусконаладочных работ на объекте, проведение соответствующих испытаний и ввод в эксплуатацию;
- технологическая, техническая эксплуатация и модернизация в процессе эксплуатации;
- прекращение тиражирования и выполнение процедур вывода СЖАТ из эксплуатации и утилизация на конкретных объектах.

Практически на всех этапах ЖЦ СЖАТ для решения различных системотехнических и системотехнических задач разрабатываются и применяются соответствующие инструментальные средства на основе имитационных моделей (ИМ) и методов моделирования, а именно:

- ИМ и методы оценки технологической и технической эффективности принимаемых системотехнических решений (выбор функциональной, информационной, технической, программной структур; разработка систем автоматизированного проектирования и электронного документооборота; организация технологической и технической эксплуатации систем и т. п.);

- имитаторы и эмуляторы в качестве отладочных комплексов для разработчиков аппаратно-программных средств, схемотехнических и программных решений, а также для испытаний на этапе доказательства работоспособности и безопасности функционирования устройства и (или) СЖАТ;
- имитаторы и эмуляторы в качестве инструментальных средств проектирования и при модернизации в процессе эксплуатации;
- ИМ и методы оценки вероятностных показателей надежности и безопасности технических решений;
- ИМ как основа автоматизированных обучающих комплексов;
- гибридные экспертные системы на основе ИМ.

Известны два класса задач моделирования автоматизированных систем управления и СЖАТ, в частности схемотехнические и системотехнические. В каждом классе существует множество возможных постановок задач и методов их решения, как детерминированных, так и стохастических.

Далее рассматриваются вопросы синтеза имитационных моделей системного уровня [1–3], предназначенных для оценки системотехнических решений, включая оценку вероятностных показателей надежности и безопасности устройств и систем ЖАТ.

В настоящее время известны следующие парадигмы имитационного моделирования сложных систем:

- системная динамика [1, 2];
- агентное моделирование [4];
- непрерывное процессное моделирование;
- дискретно-событийное моделирование;
- процессное дискретно-событийное моделирование [5].

Транспортные системы, включая системы оперативного управления движением и эксплуатационной работой, являются достаточно жестко регламентированными системами реального времени, в которых важнейшим фактором выполнения технологических процессов является время. В соответствии с этим для системного моделирования необходим

процессный дискретно-событийный подход. Реализация такого подхода возможна на основе следующих математических схем и способов:

- конечные автоматы, вероятностные автоматы,
- сети Петри,
- схемы массового обслуживания.

Массовый характер транспортных процессов и определяющее значение временных параметров перевозочного процесса определяют выбор для моделирования СЖАТ, математической схемы массового обслуживания [6, 7].

СЖАТ и автоматизированные технологические комплексы в целом в качестве систем массового обслуживания (СМО) характеризуются:

- многоканальностью;
- многофазностью;
- многофункциональностью;
- разнообразными связями элементов;
- наличием сложной системы приоритетов и дисциплины обслуживания заявок, т. е. являются сложными системами массового обслуживания (ССМО).

Очевидно, что наиболее эффективным, а в большинстве случаев единственным методом исследования таких систем является метод имитационного моделирования.

Подход к исследованию СЖАТ как ССМО определяет требования к инструментальным средствам моделирования, а именно: ведение модельного времени, наличие средств представления объектов моделируемой системы, ведение параллельных процессов, генерация случайных величин и событий, генерация потоков событий, выполнение вычислительных и логических операций в процессе моделирования, организация и ведение различных списковых структур, организация выполнения отдельных имитационных экспериментов (ИЭ) и серий ИЭ (СИЭ), накопление и предварительная обработка результатов моделирования, наличие средств отладки и диагностики моделирующих программ. Практически полностью технические проблемы имитационного моделирования систем с указанными характеристиками решаются выбором специализированного инструментального средства — GPSS World [8, 9], которое, несмотря на

солидный возраст, имеет широкое применение в процессе изучения различных дисциплин в высших учебных заведениях и развивается в настоящее время зарубежными и отечественными специалистами [10].

Целью моделирования всегда является получение новой информации о моделируемой системе или процессе. Информацию можно извлекать, приобретать, хранить, обрабатывать, передавать и использовать для решения конкретных системотехнических задач. Следует отметить, что технология имитационного моделирования обеспечивает реализацию всех указанных процессов в данной предметной области и, следовательно, является мощным инструментом обучения. К сожалению, общего определения понятия информации с учетом семантики и количественных характеристик не существует, поэтому практически в каждой предметной области это понятие описывается определенным набором свойств.

Многолетний опыт синтеза ИМ и выполнения имитационных исследований, проводимых на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, в области обоснования системотехнических и схмотехнических решений на различных этапах ЖЦ СЖАТ, например [7, 11], позволил выделить следующий набор свойств информации как результата моделирования:

- полезность относительно цели моделирования и при наличии у субъекта требуемого уровня базовых знаний в данной предметной области;
- нетривиальность относительно достигнутого ранее базового уровня знаний в данной предметной области;
- полнота — достаточность по семантике для решения поставленной задачи;
- достоверность семантическая и статистическая (для стохастических систем) относительно цели моделирования;
- своевременность относительно сроков выполнения проектов в целом;
- объективность, определяемая уровнем независимости от субъективных предпочтений разработчиков и пользователей ИМ;

- эргономичность, определяемая степенью удовлетворения потребностей пользователя по интерфейсам с ИМ.

Конкретное семантическое содержание и количественные характеристики указанных свойств определяются свойствами исследуемой СЖАТ и целью моделирования, а качество информации, как результатов моделирования, определяется характеристиками ИМ и процесса моделирования.

1. Основные понятия, термины и определения

Принципы формирования понятийного аппарата:

- 1) определяющее значение знания на современном уровне предметной области и детальное знание моделируемой СЖАТ для получения в результате моделирования информации с приведенными выше свойствами;
- 2) корректность формулировки целей моделирования на основе п. 1;
- 3) формализация для снижения субъективности результатов моделирования;
- 4) возможность пооперационного отслеживания выполнения в ИМ моделируемых процессов;
- 5) иерархичность (вложенность) ИМ в соответствии с иерархичностью структуры и (или) процессов, выполняемых и (или) происходящих в СЖАТ;
- 6) отображение в ИМ в явном виде объектов моделируемой СЖАТ;
- 7) воспроизведение в явном виде процессов, выполняемых и (или) происходящих в моделируемой СЖАТ (виртуальная реальность);
- 8) обеспечение требуемых свойств информации, особенно объективности и семантической достоверности;
- 9) возможность синтеза моделирующих алгоритмов, в которых свойства СЖАТ как ССМО записываются на уровне исходных данных;
- 10) возможность оценки широкого спектра операционных характеристик СЖАТ как ССМО;

Следует отметить, что нормативная база в области моделирования сложных технических систем явно не соответствует потребностям большого объема практического применения методологии имитационного моделирования. Действующие в настоящее время стандарты (ГОСТ Р 57412—2017, ГОСТ Р 57700—2017, ГОСТ Р 57188—2016) посвящены методам вычислительной математики, компьютерного моделирования в целом, вскользь рассматривают проблемы имитационного моделирования сложных систем и практически не содержат развитого понятийного аппарата. Это определило необходимость формирования соответствующего понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ.

ИМ и метод имитационного моделирования СЖАТ идентифицируются следующим понятийным аппаратом.

Определение 1.1. Имитационная модель системы железнодорожной автоматики: программный аналог, подобный моделируемой системе относительно цели моделирования.

Определение 1.2. Прямая имитационная модель: моделирующая программа, в которой в явном виде установлено соответствие виртуальных объектов модели реальным или виртуальным объектам моделируемой системы с учетом их взаимосвязей.

Определение 1.3. Процессная имитационная модель: моделирующая программа, воспроизводящая выполняемые системой процессы и (или) процессы, происходящие в ней в модельном времени.

Определение 1.4. Имитационная модель надежности и безопасности системы железнодорожной автоматики и телемеханики: прямая процессная моделирующая программа, воспроизводящая дискретные процессы отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния системы с целью оценки вероятностных показателей надежности и безопасности моделируемой системы.

Определение 1.5. Функционально-алгоритмическая имитационная модель: прямая процессная моделирующая программа, построенная по алгоритмическому описанию процессов обслуживания заявок в СЖАТ,

формализованных как сложные системы массового обслуживания.

Определение 1.6. Морфологическая имитационная модель: прямая, процессная моделирующая программа, построенная по структурному описанию СЖАТ.

Определение 1.7. Динамическая порционная имитационная модель: прямая, процессная моделирующая программа, построенная на основе порционной аппроксимации потоков заявок в СЖАТ.

Определение 1.8. Адекватность имитационной модели: степень соответствия имитационной модели моделируемому объекту относительно цели моделирования.

Примечание: адекватность является свойством имитационной модели, возможность применения которой для конкретных задач контролируется процедурами верификации и валидации на всех этапах ЖЦ модели.

Определение 1.9. Верификация имитационной модели: подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования к имитационной модели СЖАТ выполнены.

Определение 1.10. Валидация имитационной модели — подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного применения имитационной модели, выполнены.

Примечание: процедуры верификации отвечают на вопрос: «Сделано ли то, что предполагалось?», а валидации — «Допускается ли использовать то, что сделано для конкретных исследований?». Верификация — «взгляд» назад, а валидация — вперед по ЖЦ ИМ.

Определение 1.11. Калибровка имитационной модели: выполнение процедур тестирования и корректировки имитационной модели при неудовлетворительных результатах ее верификации и (или) валидации.

Определение 1.12. Имитационный эксперимент: единичный прогон имитационной модели с заданными значениями всех переменных и условий.

Определение 1.13. Серия имитационных экспериментов: целенаправленно организованная и проведенная в соответствии с заданным планом

последовательность имитационных экспериментов.

Определение 1.14. Планирование имитационных экспериментов: рациональная по затратам машинного времени последовательность имитационных экспериментов, спланированная в соответствии с целью моделирования.

Определение 1.15. Тактическое планирование имитационных экспериментов: планирование выполнения предварительных (контрольных) экспериментов для определения условий выполнения экспериментов по стратегическому плану.

Примечания:

1. Составление и проверка корректности функциональных спецификаций для выполнения детерминированных ИЭ.
2. Проверка принятых границ изменения управляемых переменных.
3. Оценка чувствительности и устойчивости значений операционных характеристик по крайним значениям управляемых переменных.
4. Определение условий окончания ИЭ.
5. Определение условий окончания выполнения СИЭ.
6. Результаты контрольных экспериментов частично могут использоваться совместно с результатами экспериментов по стратегическим планам.

Определение 1.16. Стратегическое планирование стохастических имитационных экспериментов: планирование выполнения серий имитационных экспериментов для оценки зависимостей операционных характеристик СЖАТ от управляемых переменных.

Определение 1.17. Рандомизированный план стохастических имитационных экспериментов: многофакторный план, в котором значения управляемых переменных в имитационных экспериментах задаются случайным образом из ограниченной области допустимых значений.

Примечание: ограничения на значения управляемых переменных накладываются на основе знания предметной области, здравого смысла и экспертных оценок.

Определение 1.18. Стратегическое планирование детерминированных имитационных экспериментов: планирование рациональной по

затратам машинного времени последовательности имитационных экспериментов, проводимой с целью проверки полноты и корректности выполнения функций СЖАТ.

Примечание: проверка соответствия выполнения функций СЖАТ функциональным спецификациям.

На основе предложенных определений сформулированы определения метода имитационного моделирования СЖАТ.

Определение 1.19. Имитационное моделирование — это (в широком смысле) многоэтапный процесс постановки задач моделирования; разработки, поэтапной верификации и валидации прямой процессной имитационной модели СЖАТ с целью обеспечения ее адекватности; планирования и проведения серий имитационных экспериментов; обработки и анализа результатов моделирования; разработки рекомендаций по системотехническим решениям.

Определение 1.20. Имитационное моделирование — это (в узком смысле) воспроизведение процессов, выполняемых реальной или виртуальной системой и (или) процессов, происходящих в ней, прямой процессной имитационной моделью в заданных условиях, определяемых целью моделирования.

Приведенные определения позволяют сформулировать основные (как положительные, так и отрицательные) свойства метода имитационного моделирования для моделирования СЖАТ:

- компьютер — не арифмометр, а средство имитации процессов, выполняемых системой по назначению и (или) происходящих в ней;
- возможность контроля и анализа имитируемого процесса поэтапно в текущем времени;
- отсутствие ограничений на вид и количество учитываемых в модели переменных и их взаимосвязей;
- оценка в одном ИЭ множества операционных характеристик объекта моделирования;
- возможность включения в одну ИМ объектов, представленных различными математическими схемами;

- возможность разработки на основе ИМ гибридных статических и динамических экспертных систем;
- развитие ИМ в соответствии с ЖЦ моделируемых систем;
- синтез ИМ — лучший способ обучения и изучения систем и процессов;
- неструктурированность и, как следствие, субъективность метода, что предъявляет высокие требования к формализации (структуризации) основных этапов разработки и применения имитационных моделей в конкретной предметной области;
- проблемы выбора инструментальных средств (известны более 300 специализированных языков и систем имитационного моделирования);
- проблемы выбора единицы и способа организации модельного времени;
- проблемы доказательства адекватности имитационных моделей;
- точечные оценки операционных характеристик;
- затратность процессов разработки, сопровождения имитационных моделей и выполнения СИЭ;
- неоднозначность понятийного аппарата и терминологии;
- отсутствие стандартов по методологии имитационного моделирования.

Введенные определения и сформулированные свойства позволяют выделить следующие определяющие характеристики применения метода имитационного моделирования для обоснования системотехнических решений в СЖАТ:

1. Метод основан на проведении имитационных экспериментов с ИМ СЖАТ и, следовательно, для стохастических систем и процессов предполагает использование методов математической статистики для обработки и оценки качества результатов моделирования. Детерминированные ИМ применяются для оценки полноты и корректности процессов функционирования СЖАТ [12].
2. Достоверность информации как результата моделирования ЖАТ имеет семантическую и статистическую составляющие и определяется адекватностью ИМ, полнотой и корректностью базовой и исходной информации, полнотой и корректностью планов ИЭ, их выполнения и применяемых методов обработки и представления информации [7, 13].
3. Метод имитационного моделирования по своей природе не структурирован.

Основным положительным следствием неструктурированности метода является то, что он практически не имеет ограничений на свойства моделируемого объекта, размерность и свойства решаемых задач. Основным недостатком является отсутствие теоретических положений и общей методологии синтеза ИМ, выполнения процессов и получение результатов моделирования. Это означает, что ИМ, разработанные для решения одних и тех же задач в одной и той же предметной области различными коллективами специалистов, могут кардинально различаться и давать различные результаты. Таким образом, следствием неструктурированности метода является субъективность результатов моделирования, что противоречит требуемому свойству объективности соответствующей информации. Следует отметить, что прямым подтверждением неструктурированности является наличие в мировой практике более 300 специализированных языков и инструментальных средств имитационного моделирования в различных предметных областях. Такое количество инструментальных средств объясняется попытками структурировать ИМ в конкретной предметной области для решения ограниченного круга задач.

Эффективным средством структурирования имитационных моделей является формализация СЖАТ по математической схеме массового обслуживания. С этой целью предложена обобщенная формализованная схема (ОФС) СЖАТ как ССМО. ОФС определяется следующим образом:

Определение 1.21. Обобщенная формализованная схема — это форма, определяющая состав и вид представления данных, включающая модель внешней среды; структурно-алгоритмическое и параметрическое описание СЖАТ как ССМО; множество операционных характеристик СЖАТ.

Определение 1.22. Заявка — это единичный объект, обрабатываемый системой массового обслуживания и характеризующийся типом, набором свойств и приоритетом.

Примечание: в качестве заявок, в зависимости от целей моделирования, могут выступать подвижные единицы, информационные сообщения, комплекты технических документов, электрические сигналы, требования на выполнение работ по техническому обслуживанию СЖАТ и т. п.

Определение 1.23. Модель внешней среды — это формализованное описание состава заявок и вероятностно-временных характеристик потоков заявок на обслуживание по всем входам ССМО.

Примечание: Внешние условия (климат, электромагнитная совместимость, механические воздействия) функционирования СЖАТ влияют на свойства устройств и их связей и должны учитываться в моделях этих устройств.

Определение 1.24. Структурно-алгоритмическое отображение системы — это формализованное описание элементов системы как обслуживающих устройств, дисциплины обслуживания заявок, связей между обслуживающими устройствами и выполняемых системой алгоритмов обслуживания заявок.

Определение 1.25. Параметрическое отображение системы — это математическое описание вероятностно-временных и детерминированных параметров процесса обслуживания заявок.

В ОФС СЖАТ как ССМО включены три группы операционных характеристик:

- 1) характеристики процесса обслуживания заявок;
- 2) структурные характеристики ССМО;
- 3) оптимизационные характеристики ССМО.

К характеристикам первой группы относятся:

- времена обслуживания и пребывания заявок в системе в целом и по типам заявок;
- времена обслуживания и пребывания заявок в подсистемах;
- вероятность своевременного обслуживания заявок в системе;
- вероятность своевременного обслуживания заявок подсистемами;
- количество одновременно обслуживаемых заявок;

- характеристики очередей на входах ССМО, ее подсистем и отдельных обслуживающих устройств;
- вероятность отказа в обслуживании;
- вероятность ожидания обслуживающего устройства (поезд);
- время ожидания обслуживающего устройства (поезд);
- количество заявок, покинувших очередь по максимальному времени ожидания.

К характеристикам второй группы относятся:

- пропускная способность системы;
- пропускная способность подсистем;
- коэффициенты загрузки подсистем;
- времена простоя подсистем;
- характеристики очередей на обслуживание заявок в отдельных подсистемах.

К третьей группе относятся комплексные показатели, учитывающие значения характеристик первой и второй групп и, как правило, имеющие экономический характер.

Следует отметить, что предложенный «классический» состав операционных характеристик СЖАТ как ССМО является открытым, может дополняться и изменяться при исследованиях конкретных систем.

2. Участники и технология моделирования

Как отмечалось ранее, по своей природе метод имитационного моделирования не структурирован и его методологию определяют как «науку и искусство» [14]. В процессе имитационных исследований взаимодействуют следующие участники:

- натуральный или виртуальный объект моделирования СЖАТ;
- участники-субъекты (эксперты, системные аналитики, программисты, пользователи имитационной модели, лица, принимающие системотехнические решения);
- инструментальные средства синтеза ИМ (в нашем случае GPSS World и компьютер);
- имитационная модель СЖАТ;
- информация (базовая, модель-описание, концептуальная модель, результаты моделирования).

В качестве инструментального средства для разработки ИМ СЖАТ выбрана среда

транзактного, процессного, дискретно-событийного моделирования сложных систем GPSS World, которая отвечает требованиям синтеза прямой, процессной модели СЖАТ как ССМО.

Следует отметить, что, хотя выбор инструментального средства имеет существенное значение, для успешных имитационных исследований СЖАТ определяющим является уровень знания современного состояния предметной области. При этом целесообразно использовать инструментальные средства, наибольший опыт применения которых имеется у разработчиков ИМ СЖАТ, даже несмотря на наличие на рынке программного обеспечения более современных систем моделирования. Подобное утверждение можно сформулировать и относительно средств автоматизации выполнения этапов подготовки ИМ, проведения серий ИЭ и обработки результатов моделирования. Эти средства положительно влияют на свойство информации — своевременность, но часто не обладают достаточной гибкостью, могут ограничивать круг выполняемых ИЭ, особенно на основе наиболее применимых в моделировании СЖАТ рандомизированных планов [15], и в значительной мере компенсируются опытом разработчиков, накопленным в процессе выполнения множества имитационных исследований СЖАТ.

Сформулированные в разделе 1 положения позволили предложить технологию имитационного моделирования СЖАТ (рис. 1), которая также может быть определена как ЖЦ ИМ [16].

ИМ разрабатывается системными аналитиками и программистами с привлечением экспертов в соответствии со сформулированными задачами конкретного этапа ЖЦ конкретной СЖАТ.

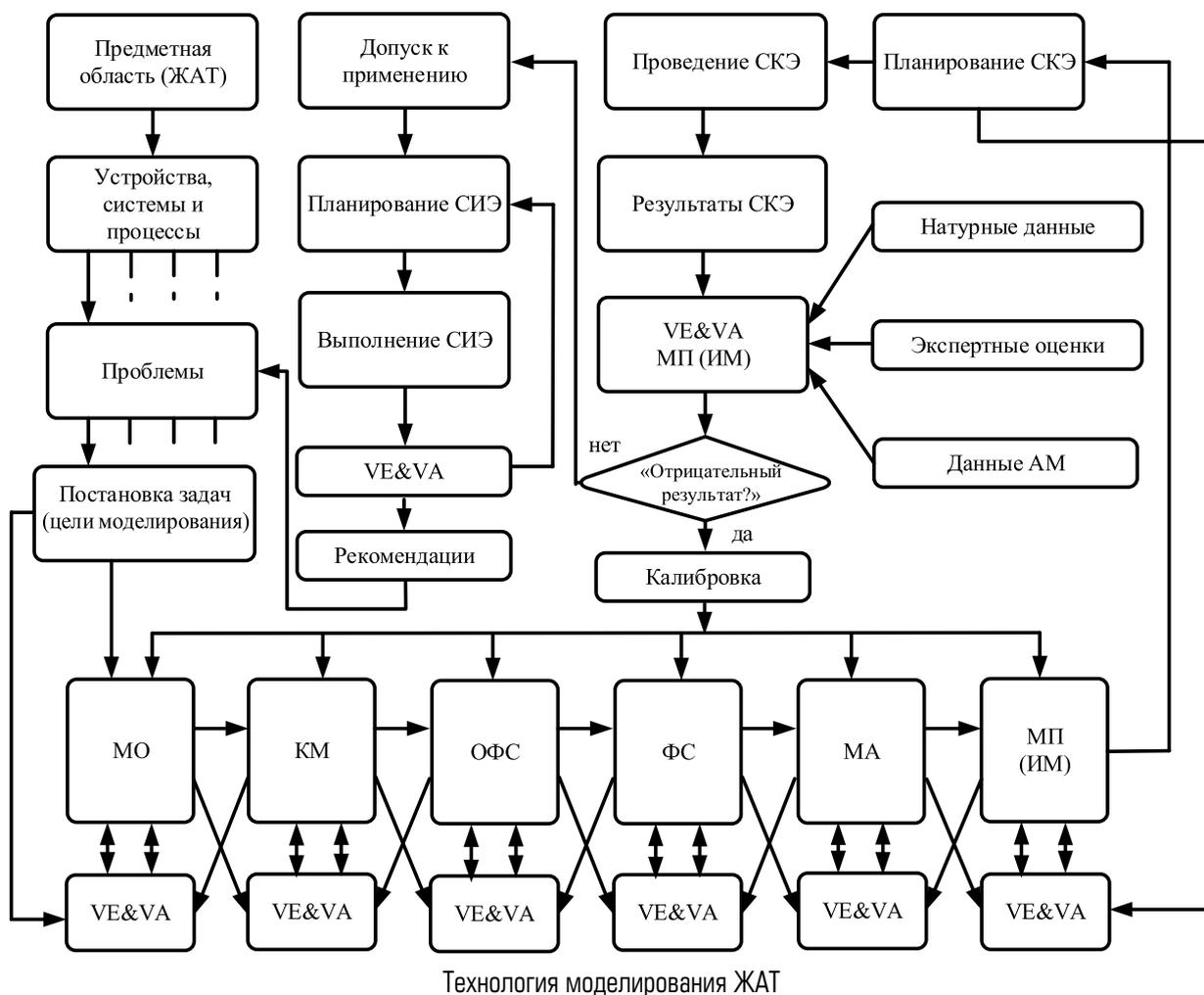
Важнейшим фактором успешного выполнения системного моделирования является качество базового уровня знаний об объекте моделирования. Базовый уровень знаний определяется опытом и квалификацией экспертов, системных аналитиков и формируется знанием нормативной документации, технической документации на объект моделирования и подобные объекты, технической литературы в предметной области, коммуникациями с другими разработчиками и должен постоянно пополняться и поддерживаться на высоком

уровне. На основе базового уровня знаний формируется модель-описание (МО), которая служит постоянно ведущейся базой данных по объекту моделирования.

Следует отметить, что одним из существенных источников ведения и корректировки базы данных МО являются результаты выполненного моделирования. В свою очередь, МО как база данных позволяет отобрать необходимую для данного исследования информацию и сформировать концептуальную модель (КМ) в соответствии с целями моделирования. Для повышения уровня объективности результатов системного моделирования ИМ СЖАТ структурируется как ССМО с использованием ОФС, которая определяет состав и вид исходной информации для синтеза модели. Формализованная схема исследуемой СЖАТ разрабатывается в соответствии с ОФС и концептуальной моделью. Таким образом, ОФС является «фильтром» информации МО и КМ для синтеза ФС СЖАТ, исследуемой с конкретными целями.

Полученная ФС позволяет разработать моделирующий алгоритм (МА), а на его основе моделирующую программу (МП) в среде GPSS World, которая и является ИМ СЖАТ. Язык GPSS является концептуально-выразительным и при достаточной квалификации системного аналитика и программиста МП ИМ может разрабатываться непосредственно по ФС, минуя стадию МА, с учетом организации управления СИЭ, сбора данных по операционным характеристикам и их предварительной обработки.

На каждом этапе разработки ИМ (МО, ФС, МА, GPSS-модель) выполняются процедуры верификации (VE) и валидации (VA) [17, 18]. Верификация подтверждает соответствие результатов выполнения данного этапа требованиям предыдущего, а валидация — возможность использования результатов данного этапа для выполнения следующего [19]. Так же верифицируются и валидируются результаты серий контрольных экспериментов (СКЭ). Процедуры VE & VA выполняются системными аналитиками с привлечением экспертов, с использованием данных по функционированию систем подобных моделируемой, результатам расчетов альтернативных моделей (АМ) и экспертных оценок [20, 21].



Технология моделирования ЖАТ

При отрицательных результатах VE и (или) VA выполняется корректировка данных этапов или калибровка GPSS-модели. Эти процедуры повторяются до получения доверия к результатам СКЭ экспертов, системных аналитиков и пользователей. Положительные результаты VE & VA обеспечивают допуск ИМ к планированию и выполнению СИЭ в рамках обеспечения информацией с требуемыми свойствами лиц, принимающих системотехнические решения.

ИМ СЖАТ сама является сложной системой с многоэтапным и длительным ЖЦ, что определяет необходимость документирования всех этапов, включая технологию проведения и результаты процедур VE & VA по всему ЖЦ ИМ СЖАТ [22]. Как правило, ИМ СЖАТ являются моделями многоразового применения, подлежат хранению и сопровождению в специальных фондах алгоритмов и программ организаций пользователей и (или) разработчиков.

Заключение

В данной работе получены следующие результаты:

- обоснован выбор метода имитационного моделирования и математической схемы массового обслуживания для исследования и обоснования системотехнических решений в области СЖАТ;
- приведены свойства, которыми должна обладать информация, используемая для синтеза ИМ и получаемая в результате выполнения СИЭ;
- показана роль формализации процессов синтеза ИМ для получения объективной и семантически достоверной информации в результате выполнения СИЭ;
- сформулированы принципы построения понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ и автоматизированных технологических комплексов;

- сформулирован комплекс терминов, определяющих предметную область — имитационное моделирование СЖАТ на системном уровне;
- введено понятие базового уровня знаний предметной области СЖАТ, и показано его значение для синтеза концептуальной модели и получения результатов моделирования (информации) с заданными свойствами;
- на основе сформулированного понятийного аппарата предложена технология имитационного моделирования СЖАТ, ключевыми моментами которой являются процедуры верификации, валидации этапов ЖЦ ИМ и моделирующей программы для решения конкретных системотехнических проблем на разных стадиях ЖЦ СЖАТ.

Дальнейшие работы по развитию понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ авторы предполагают вести в следующих направлениях:

- разработка системы терминов и определений по моделированию процессов отказов и восстановления работоспособного состояния микропроцессорных СЖАТ с избыточной структурой с учетом средств функциональной и тестовой диагностики;
- разработка системы терминов и определений по синтезу ИМ и моделированию СЖАТ для оценки показателей надежности и безопасности с учетом временных характеристик периода диагностирования, обнаружения отказов и восстановления работоспособного состояния системы;
- разработка терминологии по инструментальным средствам на основе ИМ для этапов разработки технических решений, доказательства безопасности, проектирования ЖЦ СЖАТ;
- разработка нормативных документов по понятийному аппарату в области моделирования на системном уровне на всех этапах ЖЦ СЖАТ. ▲

Библиографический список

1. Акопов А. С. Имитационное моделирование / А. С. Акопов. — М.: Юрайт, 2023. — 389 с.
2. Палей А. Г. Имитационное моделирование. Разработка имитационных моделей / А. Г. Палей, Г. А. Поллак. — СПб.: Лань, 2023. — 208 с.
3. Гончаренко А. Н. Моделирование систем. Возможности использования имитационного моделирования при формировании систем / А. Н. Гончаренко. — М.: МИСиС, 2020. — 42 с.
4. Ивашкин Ю. А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3 / Ю. А. Ивашкин. — М.: Лаборатория знаний, 2016. — 350 с.
5. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — 363 с.
6. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем: монография / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 37 с.
7. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский. — СПб.: Известия ПГУПС, 2010. — Вып. 4. — С. 186–195.
8. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World / В. В. Девятков. — Казань: Мастер Лайн, 2002. — 383 с.
9. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Д. Боев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 348 с.
10. Девятков В. В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 283 с.
11. Лыков А. А. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / А. А. Лыков, Д. С. Марков. — СПб.: Известия ПГУПС, 2012. — Вып. 1. — С. 23–38.
12. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — М.: Высшая школа, 2001. — 343 с.
13. Лоу А. М. Имитационное моделирование. Классика CS / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. — СПб.: BHV, 2004. — 846 с.
14. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Р. Шеннон. — М.: Мир, 1978. — 287 с.
15. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский. — М.: Мир, 2019. — 224 с.
16. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation / O. Balci // Simulation. — 2012. — Vol. 88(7). — Pp. 870–883.
17. Balci O. Verification, validation and accreditation / O. Balci // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. — 1998. — Pp. 41–48.
18. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 106–114.
19. Law A. M. How to build valid and credible simulation models / A. M. Law, M. G. McComas // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 22–29.
20. Carson J. S. Model verification and validation / J. S. Carson // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. — 2002. — Pp. 52–58.
21. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W. D. Kelton. — Fourth Edition. — McGraw-Hill, 2007. — 768 p.
22. Rabe M. Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik / M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. — 195 p.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 193–204
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204

Technology of Simulation Modeling for Railway Automation and Remote Control Systems

Information about authors

Konstantinova T. Yu., PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.
E-mail: at-tanya@mail.ru

Lykov A. A., PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: bastdrew@mail.ru

Markov D. S., PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: MDS1945@yandex.ru

Nasedkin O. A., PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

Sokolov V. B., PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: SVB9@yandex.ru

Automation and Remote Control on Railways Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

Abstract: The aim of this article is to summarize the experience and develop the conceptual framework of simulation modeling in the field of research and validation of system engineering solutions taken at various stages of the life cycle of railway automation and remote control systems. To address the stated objective, a systemic approach and formalization of the key principles and challenges of simulation modeling at the system engineering level have been employed. Terms and definitions have been formulated, collectively forming the conceptual framework in the subject area under consideration. Based on the introduced conceptual framework, a technology for simulation modeling of railway automation and remote control systems at the system level has been proposed. It is stated that a simulation model of a complex system is itself a complex system with its own life cycle, represented in the form of the proposed modeling technology. The main problem highlighted in the application of the simulation modeling method is its lack of structure. To address this issue, various methods of formalization have been proposed at all stages of the life cycle of simulation models. The proposed conceptual framework ensures higher quality of communicativeness and training of participants in solving system engineering problems using simulation modeling methodology. The technology of simulation modeling has been applied and continues to be applied at various stages of the life cycle of microprocessor-based railway automation and remote control systems.

Keywords: railway automation and remote control systems; simulation model; life cycle; conceptual framework; simulation modeling technology.

References

1. Akopov A. S. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling]. Moscow: Yurayt Publ., 2023, 389 p. (In Russian)
2. Paley A. G., Pollak G. A. *Imitatsionnoe modelirovanie. Razrabotka imitatsionnykh modeley* [Simulation. Development of simulation models]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2023, 208 p. (In Russian)
3. Goncharenko A. N. *Modelirovanie sistem. Vozможности ispol'zovaniya imitatsionnogo modelirovaniya pri formirovanii sistem* [Modeling systems. Possibilities of using simulation modeling in the formation of systems]. Moscow: MISIS Publ., 2020, 42 p. (In Russian)
4. Ivashkin Yu. A. *Mul'tiagentnoe modelirovanie v imitatsionnoy sisteme Simplex3* [Multi-agent modeling in the simulation system Simplex3]. St. Petersburg: Laboratoriya znaniy Publ., 2016, 350 p. (In Russian)
5. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2009, 363 p. (In Russian)
6. Kudryavtsev E. M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem: monografiya* [GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems: monograph]. Moscow: DMK Press Publ., 2018, 37 p. (In Russian)
7. Markov D. S., Bulavskiy P. E. *Matrichnyy metod formalizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya* [Matrix method of formalization of simulation models of complex queuing systems]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2010, Iss. 4, pp. 186–195. (In Russian)
8. Devyatkov V. V. *Rukovodstvo pol'zovatelya po GPSS World* [User manual for GPSS World]. Kazan': Master Layn Publ., 2002, 383 p. (In Russian)
9. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [System Modeling. Tools GPSS World]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2004, 348 p. (In Russian)
10. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. *Imitatsionnye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS STU-DIO* [Simulation studies in the GPSS STU-DIO modeling environment]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 283 p. (In Russian)
11. Lykov A. A., Markov D. S. *Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh pro-tsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte* [The method of formalization of simulation models of technological processes in the economy of automation and telemechanics in railway transport]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2012, Iss. 1, pp. 23–38. (In Russian)
12. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p. (In Russian)
13. Lou A. M., Kel'ton V. D. *Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS* [Simulation. Classics CS]. St. Petersburg: BHV Publ., 2004, 846 p. (In Russian)
14. Shennon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem — iskusstvo i nauka* [Simulation of systems — art and science]. Moscow: Mir Publ., 1978, 287 p. (In Russian)
15. Brodskiy V. Z. *Vvedenie v faktornoe planirovanie eksperimenta* [Introduction to factorial planning of experiment]. Moscow: Mir Publ., 2019, 224 p. (In Russian)
16. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation. *Simulation*, 2012, vol. 88(7), pp. 870–883.
17. Balci O. Verification, validation and accreditation. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998, pp. 41–48.
18. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 106–114.
19. Law A. M., McComas M. G. How to build valid and credible simulation model. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 22–29.
20. Carson J. S. Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, pp. 52–58.
21. Law A. M., Kelton W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. Fourth Edition. McGraw-Hill, 2007, 768 p.
22. Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. *Verifikation und Validierung fur die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, 195 p.