

**М.В. Мельников**

## **ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

*Мельников Михаил Викторович, окончил факультет кибернетики Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики. Главный специалист ОАО «НИИАА». Имеет статьи в области информационного и лингвистического обеспечения автоматизированных систем управления. [e-mail: mikemel1980@rambler.ru].*

### **Аннотация**

В статье представлен обзор основных результатов опытно-конструкторской работы «Создание комбинированного имитационно-аналитического комплекса моделирования процессов функционирования сложных радиоэлектронных информационно-управляющих систем реального времени» (ОКР «Пядь»). Приведено описание технологии комбинированного имитационно-аналитического моделирования, позволяющего существенным образом повысить быстродействие вычислений при сохранении точности расчета выходных показателей.

Ключевые слова: комбинированный имитационно-аналитический комплекс моделирования, имитационно-аналитическая модель, суррогатная модель, технологический процесс.

### **Введение**

ОКР «Пядь» выполняется в соответствии с Федеральной целевой программой «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2007–2010 годы и на период до 2020 года» и Федеральной целевой программой «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы в рамках направления развития базовых технологий создания радиоэлектронных средств и комплексов.

Целью ОКР «Пядь» является разработка промышленной технологии создания комбинированного имитационно-аналитического комплекса (КИК) моделирования процессов функционирования сложных радиоэлектронных информационно-управляющих систем реального времени (СР ИУС РВ), готовность которой к промышленной реализации должна быть подтверждена на уровне опытного образца КИК.

### **Термины и определения**

Прежде чем перейти к описанию указанной технологии, необходимо ввести основные понятия и определения.

Модель – изделие, упрощенно воспроизводящее или имитирующее конкретные свойства создаваемого или существующего объекта и изготовленное для проверки принципа их действия и определения отдельных характеристик.

Математическая модель – система математических соотношений, описывающих изучаемый объект.

Аналитическая модель – модель, представленная в виде математических уравнений (системы уравнений).

Имитационная модель – динамическая модель, представленная в виде структуры моделируемого объекта и содержащая вероятностные элементы.

Монте-Карловская (статистическая) модель – модель, представленная в виде системы или сети приборов массового обслуживания.

Натурная модель – сам объект или его физическая модель.

Физическая модель – модель, находящаяся в отношении физического подобия к объекту-оригиналу. Физическая модель и объект-оригинал имеют одинаковую физическую природу.

Модель, основанная на физических принципах, – модель, находящаяся в отношении физического подобия к объекту-оригиналу. Физическая модель и объект-оригинал имеют разную физическую природу.

Радиоэлектронное средство (РЭС) – изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники [1].

Радиоэлектронная система (РЭС система) – РЭС, представляющее собой функционально законченную совокупность радиоэлектронных комплексов и устройств [1].

Радиоэлектронный комплекс (РЭК) – РЭС, представляющее собой функционально законченную совокупность радиоэлектронных устройств, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями. В зависимости от сложности решаемых задач РЭК может быть автономной частью другого комплекса [1].

Радиоэлектронное устройство (РЭУ) – РЭС, представляющее собой совокупность функционально и конструктивно законченных сборочных единиц. В зависимости от сложности технической задачи РЭУ может быть составной частью другого РЭУ [1].

Радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ) – РЭС, представляющее собой функционально и конструктивно законченную сборочную единицу, выполняющее радиотехническую и / или электронную(ые) функцию(и) и не имеющее самостоятельного применения [1].

Технология – совокупность научно-технических знаний, процессов, материалов и оборудования, которые могут быть использованы при разработке, производстве или эксплуатации продукции [2].

Научно-технические знания – знания, основанные на рациональности, характеризующиеся логической обоснованностью, доказательностью, воспроизводимостью результатов и проверяемостью.

Технологический процесс – процесс, содержащий целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда [2].

Материалы – исходные предметы труда, потребляемые для создания и изготовления изделия [2].

Технологическое оборудование – совокупность средств производства, необходимых для осуществления технологического процесса [2].

## Описание технологии создания изделия КИК

### 1. Содержание технологии

Технология создания изделия КИК представляет собой совокупность научно-технических знаний, процессов, материалов и оборудования, используемых при разработке, производстве и эксплуатации КИК моделирования процессов функционирования СР ИУС РВ.

В таблице представлено описание составных частей технологии создания изделия КИК.

Таблица

Составные части технологии создания изделия КИК

Технология	Стадия разработки	Стадия производства	Стадия эксплуатации
Научно-технические знания	Государственный контракт; техническое задание на ОКР «Пядь»; нормативные документы (ГОСТ, СТП, РУК и т. д.); разделы высшей математики <sup>1</sup>	Рабочая конструкторская (РКД) <sup>2</sup> и программная документация (ПД) <sup>3</sup> литеры «О <sub>1</sub> »; технологическая документация (ТД) <sup>4</sup> литеры «О <sub>1</sub> » на основе РКД и ПД литеры «О <sub>1</sub> »	Эксплуатационная документация (ЭД) <sup>5</sup> на изделие КИК; методики моделирования СР ИУС РВ; исходные данные для моделирования
Процессы	Процессы разработки, изготовления и испытаний опытного образца КИК в соответствии с ГОСТ РВ 15.203–2001	Заказ и изготовление изделия КИК в соответствии с ТД «Описание технологических процессов изготовления КИК»	Моделирование СР ИУС РВ в соответствии с методиками моделирования; техническое обслуживание изделия КИК
Материалы	Покупные технические и программные средства в соответствии со схемой деления структурной на опытный образец изделия КИК	Технические и программные средства в соответствии со схемой деления структурной на изделие КИК	Запасные инструменты и принадлежности; расходные материалы
Технологическое оборудование	Оборудование для изготовления и испытаний опытного образца КИК	Оборудование для производства изделия КИК	Программно-аппаратные средства изделия КИК

Примечания:

1. Разделы высшей математики включают в себя:
  - теорию вероятности;
  - математическую статистику;
  - теорию систем и сетей массового обслуживания (СМО и СеМО);
  - методы многокритериальной оптимизации.

2. РКД – по ГОСТ 2.102–68.

3. ПД – по ГОСТ 19.101–77.

4. ТД включает в себя:

– методику моделирования СР ИУС РВ, представляемых в виде СеМО на основе дискретно-событийного моделирования;

– методику моделирования СР ИУС РВ, основанную на физических принципах;

– методику проведения оптимизации параметров управления и определения точности результатов моделирования СР ИУС РВ;

– методику калибровки моделей СР ИУС РВ по результатам натурных экспериментов;

– методику валидации технологии создания КИК моделирования процессов функционирования СР ИУС РВ;

– описание технологического процесса изготовления изделия КИК.

5. ЭД – по ГОСТ 2.601–95 и ГОСТ 19.101–77.

### *2. Методики моделирования СР ИУС РВ*

Методика моделирования СР ИУС РВ, представляемых в виде СеМО на основе дискретно-событийного моделирования, содержит описание процессов построения математических моделей, их возможностей и ограничений в использовании на различных стадиях жизненного цикла исследуемых СР ИУС РВ. Данная методика предназначена для компьютерного математического моделирования процессов функционирования СР ИУС РВ с использованием следующих видов моделей:

а) аналитических;

б) имитационных;

в) комбинированных.

Аналитическая модель является математической моделью, сконструированной на основе формальных зависимостей показателей моделируемых СР ИУС РВ от параметров и применения численных методов их расчета. В СМО и СеМО различные ресурсы СР ИУС РВ рассматриваются как совокупность обслуживающих устройств, между которыми циркулируют запросы и информационные сообщения, или процессы и потоки (создаваемые в результате выполнения системных и специальных программ) со своими характеристиками и потребностями в ресурсах. Главным преимуществом аналитических моделей СМО и СеМО по сравнению с другими видами моделирования является простота их использования и скорость получения результатов.

Имитационная модель представляет собой компьютерное воспроизведение алгоритма функционирования СР ИУС РВ или ее компонента с помощью статистических испытаний (метод Монте-Карло). В алгоритмах имитационных моделей может быть отражена практически любая особенность моделируемой СР ИУС РВ. Основная проблема создания и использования имитационных моделей заключается в высокой трудоемкости их разработки и использования.



Рис. 1. Уровни разукрупнения РЭС

Построение аналитических и имитационных моделей СР ИУС РВ в виде СМО и СеМО проводилось с использованием процедуры разукрупнения РЭС в соответствии с ГОСТ Р 52003–2003. На рисунках 1 и 2 представлены уровни разукрупнения РЭС в общем виде и для моделирования СР ИУС РВ соответственно.



Рис. 2. Разукрупнение СР ИУС РВ

Комбинированная модель строится как многоуровневая иерархическая система, в которой объединены аналитические и имитационные модели, в наибольшей степени отражающие особенности функционирования моделируемой СР ИУС РВ (рис. 3). При этом процедура имитации процессов СР ИУС РВ осуществляется в значительно более «медленном» масштабе времени по сравнению с процедурой аналитического расчета процессов.



Рис. 3. Комбинированное моделирование СР ИУС РВ

Таким образом, комбинированная модель СР ИУС РВ имеет двухуровневую структуру: имитационная модель верхнего уровня, отражающая движение запросов между клиентами и серверами через ЛВС передачи данных, и аналитическая модель вычислительного процесса нижнего уровня, например, отражающая выполнение запросов в сервере приложений или в другом сервере. Комбинированность модели проявляется также в способах представления процессов на разных уровнях. Имитационная модель оценивает показатели моделируемой СР ИУС РВ в переходном или стационарном режимах, в то время как аналитические расчеты выполняются в стационарных предположениях. Из имитационной модели в аналитическую поступают данные о типах режимов функционирования СР ИУС РВ

и параметрах моделирования на нижнем уровне, а из аналитической в имитационную возвращаются оценки показателей, которые становятся основой имитационной модели.

Методика моделирования СР ИУС РВ, основанная на физических принципах, содержит описание функционирования радиоэлектронного и цифровых трактов передачи информации с использованием аппаратных имитаторов каналов связи. Принципы работы имитаторов заключаются в построении моделей указанных трактов передачи информации за счет использования физических закономерностей электромагнитных цепей, аналогичных закономерностям в указанных трактах.

Методика проведения оптимизации параметров управления и определения точности результатов моделирования СР ИУС РВ содержит общие принципы, необходимые условия и последовательность создания суррогатных моделей, принципы и последовательность снижения размерности моделей, методы оценки точности суррогатных моделей, методы оптимизации параметров управления моделей. На рисунке 4 представлена общая структура методики оптимизации.



Рис. 4. Основные процедуры оптимизации параметров и определения точности результатов моделирования

При построении суррогатной модели моделируемая СР ИУС РВ рассматривается как «черный ящик», характеризуемый данными на входах и выходах. Суррогатная модель представляет собой компьютерную математическую модель СР ИУС РВ, имитирующую все или некоторые (в зависимости от необходимой точности моделирования) функции отклика исходной модели (с некоторой погрешностью). Построение суррогатной модели осуществляется с использованием абстрактных математических методов анализа данных (результатов) натуральных и / или вычислительных экспериментов, в том числе построения адекватной поверхности отклика, снижения размерности, выделения главных переменных, адаптивного планирования экспериментов, аппроксимации и т. д. Основными математическими методами при построении суррогатных моделей являются аппроксимация многомерной зависимости исследуемых показателей от факторов и оптимизация.

Отличительной особенностью суррогатной модели является более низкая размерность по сравнению с исходной, что позволяет заменить большое число исходных и, как правило, зависимых параметров исходной модели небольшим набором новых независимых входных параметров, позволяющим в то же время близко воспроизвести наиболее актуальные состояния исходной модели.

Для суррогатных моделей обязательной процедурой является оценка их точности, т. е. оценка погрешности, с которой функции отклика суррогатной модели

воспроизводят соответствующие функции исходной модели. Оценка производится путем сравнения значений исходной и суррогатной моделей на некотором тестовом множестве (отличном от обучающего множества, использованного при построении суррогатной модели).

Если точность построенной суррогатной модели удовлетворяет требованиям адекватности воспроизведения функций отклика исходной модели, то она подвергается процедуре оптимизации, заключающейся в поиске значений входных параметров, при которых выделенные функции отклика принимают максимальные и минимальные значения.

Методика калибровки моделей СР ИУС РВ по результатам натурных экспериментов содержит описание алгоритмов установления соответствия между показателями СР ИУС РВ, определяемыми на ее математической модели, и показателями, воспроизводимыми эталоном (опытным образцом или реальной СР ИУС РВ). Одновременно должны обеспечиваться сравнимость и точность рассчитываемых на модели и измеряемых на реальной СР ИУС РВ показателей функционирования. На рисунке 5 приведена схема процесса калибровки математической модели СР ИУС РВ, где

$W$  – входные потоки данных на эталон;

$W'$  – входные потоки данных на модель;

$I$  – выходные показатели, полученные путем измерения функционирования объекта;

$I'$  – выходные показатели, полученные путем измерения функционирования модели.

К показателям эталона и модели относятся:

- показатели реактивности (время реакции на входную нагрузку, время ответа, время передачи информационных сообщений);
- показатели использования (нагрузка устройств и каналов запросами различных классов);
- показатели продуктивности (пропускная способность, производительность).

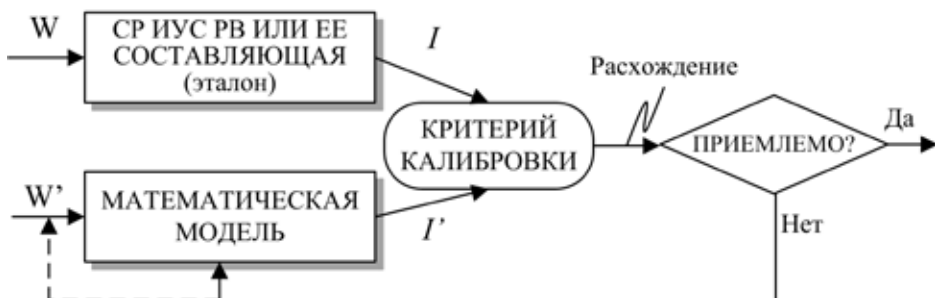


Рис. 5. Схема процесса калибровки математической модели



Основными принципами калибровки математических моделей являются:

- наличие адекватного эталона;
- учет цели последующего использования математической модели на различных стадиях жизненного цикла СР ИУС РВ;
- предварительные измерения выходных показателей функционирования реальной СР ИУС РВ или опытного образца ввиду вероятностного характера процессов функционирования;
- обоснование законов распределения входных потоков данных и выполнения запросов различных классов математической модели;
- создание требуемого профиля рабочей нагрузки, т. е. определение генеральной совокупности входных потоков данных;
- планирование полного эксперимента для процедуры калибровки, представляющего собой множество отдельных экспериментов с моделью и эталоном.

Методика валидации технологии создания КИК моделирования процессов функционирования СР ИУС РВ содержит описание анализа условий применения и оценки соответствия характеристик предложенной технологии заданным требованиям использования. Результатом валидации является документальное подтверждение доказательств путем представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения технологии, выполнены, декларируемые свойства и характеристики подтверждаются, а поставленная цель предназначения технологии достигнута.

Описание технологического процесса изготовления КИК включает в себя последовательность следующих технологических процессов:

- подготовка производства организации-изготовителя КИК;
- монтаж и наладка КИК;
- проведение приемосдаточных испытаний КИК по техническим условиям;
- проведение приемочных испытаний КИК;
- поставка КИК заказчику.

Производство КИК носит единичный характер, т. е. их выпуск осуществляется в малом количестве и повторное изготовление не предусматривается. В связи с этим ТД на технологический процесс изготовления КИК представляется в маршрутно-операционном описании [3].

## **Заключение**

В статье были рассмотрены основные результаты выполнения ОКР «Создание комбинированного имитационно-аналитического комплекса моделирования процессов функционирования сложных радиоэлектронных информационно-управляющих систем реального времени», одной из задач которой является разработка технологии комбинированного имитационно-аналитического моделирования ИУС. Разработка и внедрение данной технологии обеспечат производство КИК по заказам разработчиков конкретных СР ИУС РВ:

- для компьютерной обработки проектных решений на всех этапах жизненного цикла разрабатываемых СР ИУС РВ;

- существенного повышения качества принятия решений при проектировании СР ИУС РВ;
- сокращения трудоемкости и времени создания СР ИУС РВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52003–2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
2. ГОСТ 3.1109–82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
3. ГОСТ 3.1102-2011. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. Общие положения.