

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Исаевой Ольги Сергеевны

«Технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

Актуальность темы диссертационной работы Исаевой О.С. обусловлена необходимостью формирования новых подходов к цифровой трансформации жизненного цикла изделий ракетно-космической промышленности, призванных способствовать повышению эффективности процессов создания и сопровождения сложных технических систем. Ключевые факторы цифрового управления жизненным циклом изделия в приоритете ставят задачу построения его цифрового двойника на ранних этапах проектирования и, в дальнейшем, последовательного уточнения такого представления путём накопления данных о поведении устройства при изготовлении, испытаниях и эксплуатации. Неоспоримым достоинством цифрового двойника является возможность его виртуального исследования и получения сведений как о штатных режимах работы наблюдаемого устройства, так и проектирования его нештатного поведения, что особенно важно для бортовых систем космических аппаратов, проведение многократных экспериментов с которыми являются дорогостоящими и технологически сложно выполнимыми, а требования к их надёжности и жизнеспособности крайне высоки.

В отличие от традиционных секторов цифровизации, направленных на поддержку серийного производства высокотехнологичной продукции, создание бортовых систем космических аппаратов имеет ярко выраженную специфику данных, которые должны лежать в основе цифровых двойников, связанную, с одной стороны, с уникальностью разрабатываемых изделий, с другой – с особенностями бизнес-процессов предприятий аэрокосмической отрасли. Такая специфика затрудняет создание и тиражирование как самих цифровых двойников, так и применяемых программных систем. Бортовые системы представляют собой совокупность электрических, электромагнитных, электронных и оптических приборов и программного обеспечения. Процесс формирования адекватного цифрового двойника такой системы лежит на стыке специализированных компетенций специалистов из смежных областей и для быстрого прототипирования требует инструментов построения и применения проблемно-ориентированных баз знаний, позволяющих моделировать логику работы создаваемых устройств и их взаимодействие с сопряжённым окружением. Проверка адекватности цифрового двойника связана с получением и накоплением данных не только виртуальных, но и натуральных экспериментов, что требует построения инструментов подготовки и проведения испытаний. Это даёт основание утверждать, что научная проблема, сформулированная в диссертации и касающаяся создания цифровых инструментов повышения эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры, является актуальной. Её решение путём создания новой технологии интеллектуального имитационного

моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов, объединяющей информационные, измерительные, вычислительные и исследовательские функции в единый технологический комплекс, имеет существенное значение для аэрокосмической отрасли.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, определяется правильным выбором, корректным применением и развитием существующих методов теории системного анализа, искусственного интеллекта, информационных технологий и измерительных систем. Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов, представленные в научных источниках и касающиеся построения универсальных и специализированных систем имитационного моделирования, систем подготовки и проведения испытаний и их интеграции в рамках базовых компонент цифровых двойников. Список использованной литературы содержит 360 наименований, содержательная часть которых даёт представление о текущем состоянии дел в исследуемой проблемной области. На основе проведённого анализа автором сформулирована цель исследования, которая в рамках диссертационной работы достигнута в полном объёме. Выделены и решены задачи, обеспечившие достижение цели. Для этого автором создан оригинальный комплекс методов цифровой поддержки, основанный на интеллектуальной имитационной модели. Для подтверждения теоретических положений автором проводятся экспериментальные исследования, целью которых, с одной стороны, является установление соответствия между построенной моделью и функциями реальной технической системы, а с другой стороны, выявлены критерии оценки эффективности и применимости предложенных автором подходов. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований и сопоставлением полученных результатов с технической документацией.

Оценка новизны и достоверности результатов и выводов

В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты положения, основная суть которых направлена на поддержку двух взаимосвязанных научных направлений. Первое определяет подходы к построению цифровых двойников, второе – к применению цифровых двойников на этапах жизненного цикла бортовых систем космических аппаратов.

Для создания формальных подходов к построению цифровых двойников получены следующие результаты:

- Предложено понятие интеллектуальной имитационной модели, как логического объединения баз знаний, программно-математических моделей и данных натурных экспериментов на основе семантического представления бортовой системы.
- Разработаны методы построения интеллектуальных имитационных моделей (формирование структуры модели, базы знаний) и их исследования, которые обеспечивают интеграцию базовых компонент цифровых двойников.

Для применения цифровых двойников получены и формально представлены следующие научные результаты:

– Предложены новые методы анализа функционирования бортовых систем, предназначенные для подготовки испытаний (формирование сценариев, методик испытаний на основе баз знаний, контроль полноты) и их проведения (в качестве имитаторов систем окружения, для исследования результатов по прецедентам имитационного моделирования).

В диссертации предложена технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем, обеспечивающая эффективность цифровых процессов производства за счёт комплексного синергетического эффекта от объединения представленных моделей и методов. Применение предложенной технологии выполнено в проблемно-ориентированных системах, также представляющих новый научный результат диссертации, являющихся эффективными инструментами моделирования, визуализации, мониторинга и анализа данных на этапах жизненного цикла бортовых систем космических аппаратов.

Значимость полученных в диссертации результатов для науки и практики несомненна. В целом, они представляют новые научные знания, развивающие теоретические подходы к построению цифровых двойников и позволяющие решать новые функциональные задачи предметной области. Формализованное представление результатов обеспечивает исследование системной проблемы, а разработанные алгоритмы позволяют выполнять на их основе практическую реализацию цифровой поддержки жизненного цикла сложных технических систем. Предложенные методы предоставляют инструменты для развития цифровых двойников и включения в них дополнительных данных и знаний, полученных на этапе испытаний бортовых систем, что повышает уровень адекватности моделей и позволяет в дальнейшем моделировать на их основе различные режимы работы бортовых систем, проходящие в штатных и нештатных условиях.

О достоверности результатов исследования можно судить по их успешному внедрению в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» при организации производства бортовой аппаратуры командно-измерительных систем космических аппаратов и Сибирском федеральном университете, что подтверждено соответствующими актами.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 65 печатных работах, в том числе 21 – в российских журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и 18 – в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Результаты неоднократно обсуждались на международных и всероссийских конференциях и получили одобрение ведущих специалистов. Получены 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 315 страницах машинописного текста и состоит из введения, шести глав, заключения, списка

использованных источников, списка сокращений и двух приложений. Качество оформления текста соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям.

Введение содержит общую характеристику работы, её цель и задачи, оценку степени разработанности темы, новые научные результаты и примеры их апробации.

Первая глава включает анализ системной проблемы и показывает необходимость создания новых технологий для её решения. В ней приведён обзор современных исследований по направлениям: компьютерного моделирования, искусственного интеллекта и испытаний сложных технических систем.

Вторая глава представляет описание полученных научных результатов в части создания цифровых двойников. Выполнена формализация понятия интеллектуальной имитационной модели, как базового элемента цифрового двойника, и приведены основные методы, обеспечивающие построение и верификацию моделей на основе экспертных знаний и программ испытаний.

Третья глава касается новых научных результатов, обеспечивающих как развитие цифровых двойников за счёт наполнения их данными натурных экспериментов, так и их применения для проведения испытаний технических систем. Представлены методы, позволяющие проводить анализ характеристик устройств на программных моделях, формировать и исследовать полноту программ испытаний, имитировать системы окружения при автономном проведении испытаний и выполнять анализ их результатов.

Четвёртая глава диссертационного исследования является обобщением теоретических наработок в комплексное решение – технологию интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем. Технология содержит новые оригинальные методы и модификации существующих подходов и обеспечивает комплексное решение задач, возникающих в деятельности инженеров-конструкторов бортовой аппаратуры при проектировании, разработке и испытаниях бортовых систем. Выполнено графическое описание задач цифровой поддержки жизненного цикла бортовых систем, сформулирована онтология системной проблемы, проведено структурно-функциональное моделирование. Сформирован перечень функциональных характеристик, вносящих наибольший вклад (построены матрицы попарных сравнений) в поддержку специалистов предметной области.

Пятая глава представляет описание проектных решений, реализующих предложенную технологию в проблемно-ориентированной системе «Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата». Показаны примеры построения цифровых двойников и их применения для моделирования бортовой аппаратуры командно-измерительных систем.

Шестая глава представляет описание проектных решений, обеспечивающих эффективную поддержку испытаний в «Программном обеспечении контрольно-проверочной аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата». Показаны основные технологические приёмы, автоматизирующие ключевые задачи специалистов предметной области. Методом анализа иерархий проведено

исследование эффективности применения новой технологии для проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры.

Заключение содержит основные результаты и выводы, показывающие выполнение целей и задач диссертационной работы.

В Приложении 1 приводятся копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ; в Приложении 2 – копии документов о внедрении результатов диссертационного исследования.

Замечания по диссертационной работе в целом:

1. В работе используются, но не определены термины «интеллектуальная имитационная модель» (с. 13 и др.), «цифровая модель» (с. 35), «программно-математическая модель» и «гетерогенная модель» (с. 101), «программная модель» (с. 151). Единственное, на с. 57 определяется термин «интеллектуальные системы имитации» (на основании литературного источника 1991 г. издания).
2. Обзор, выполненный в разделе 1.2.3 «Методы искусственного интеллекта для моделирования сложных технических систем» (с. 57-67) является неполным. Не упоминаются, в частности, биоинспирированные методы (генетические алгоритмы, эволюционные вычисления), искусственные нейронные сети, методы машинного обучения и Big Data, которые используются, например, при моделировании и исследовании энергетических систем. Возможно, следовало говорить не о сложных технических системах вообще, а ограничиться рассматриваемой предметной областью, в которой используются анализируемые автором методы.
3. В разделе 3.1 «Моделирование бортовых систем на основе логического вывода в базах знаний интеллектуальной имитационной модели» (с. 116-120) говорится о базах знаний и логическом выводе, но не упоминается инструмент реализации логического вывода (например, экспертная система или машина вывода).
4. На с. 180 говорится о «подсистеме ведения баз данных» и о «редакторе пакетов данных». Означает ли это, что работа с данными реализована самостоятельно, без использования одной из распространенных СУБД? Если да, то по какой причине?
5. Неясно, как соотносятся интеллектуальная имитационная модель (ИИМ) и цифровой двойник (ЦД). С одной стороны, по логике вещей, ИИМ является *одним из компонентов ЦД* (с. 217: «В состав компонент ЦД входит база команд ИИМ»). С другой стороны, на с. 114 утверждается: «Выполнена формализация понятия ИИМ функционирования бортовой системы, которая представляет *формальный подход к построению ЦД*».
6. Не определен четко состав компонентов ЦД и не приводится его архитектура. Так, на с. 13 говорится о формировании «ИИМ, обеспечивающей построение и применение ЦД, объединяющих базы знаний, виртуальные инструменты и результаты натурных испытаний...». На с. 157, напротив, упоминается, что «ЦД включают базы данных, программно-математические модели технических систем и данные натурных испытаний на всех этапах жизненного цикла производства

бортовой аппаратуры» (т.е. данные натурных испытаний не хранятся в БД?). Отсюда следует, что ИИМ не входит в состав ЦД, а «находится над ним»?

7. Есть несколько мелких формальных замечаний: так, на с. 304 приводится «Свидетельство о регистрации программного ядра инфраструктуры имитационного моделирования», но в тексте такая инфраструктура не упоминается; на с. 12 приводятся названия базовых проектов (очевидно, проектов по госзаданию), но не приводятся даты их выполнения; на стр. 159 используется сленговый термин «функционал» вместо «функциональность»; наконец, несмотря на высокий в целом уровень выполнения работы, есть досадные опечатки в диссертации: (с. 116 (и оглавление, с.3), 118, 126, 146, 162, 176, 180 (и оглавление, с. 4), 236 и в автореферате: с. 13,15, 19, 22, 26.

В то же время, отмеченные недостатки относятся преимущественно к стилю изложения и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Заключение

В диссертационной работе Исаевой О.С. решена важная научно-практическая проблема, связанная с повышением эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Диссертация Исаевой О.С. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты базируются на достаточном числе исходных данных и примеров, выводы достоверны и заключения обоснованы. По каждой главе и работе в целом сделаны аргументированные выводы.

Автореферат отражает основное содержание диссертации, представляет описание проведённого исследования, основные результаты и выводы. Оформление автореферата и диссертации соответствуют требованиям ВАК РФ.

В целом можно сделать вывод, что диссертация содержит научные результаты, представляющие новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие космической отрасли страны.

Считаю, что диссертация соответствует требованиям действующего «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор, Исаева Ольга Сергеевна, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий отделом Систем
искусственного интеллекта в энергетике
ФГБУН Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Массель Людмила Васильевна

Адрес организации: 664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130.

Тел. (395-2)-500-646, +7 914 873 6049. Эл. адрес: massel@isem.irk.ru.

Я, Массель Людмила Васильевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Исаевой Ольги Сергеевны в диссертационном совете 24.2.403.01 при Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, и их дальнейшую обработку.



Подпись Массель Л.В. заверяю

Нач. отд. кадров

И.В. Рубцова

« 31 »

01

22 г.

31.01.2022