

О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора Миронова Андрея Николаевича, профессора кафедры «Конструкция ракет-носителей и ракетных двигателей», начальника отдела проблем эксплуатации ракетно-космической техники и объектов инфраструктуры научно-образовательного центра Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства Обороны Российской Федерации, на диссертацию Исаевой Ольги Сергеевны, выполненную на тему: «Технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов» и представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

В современных условиях повышается значимость устойчивого функционирования орбитальных группировок космических аппаратов (КА) различного целевого назначения для решения социально-экономических, научных и оборонных задач государства. Успешное функционирование бортовых систем (БС) КА во многом определяется следующими факторами: надежностью элементной базы БС КА, совершенством технических решений, положенных в основу конструкций бортовых систем и качеством экспериментальной отработки как отдельных БС КА, так и КА в целом.

Как известно, под экспериментальной отработкой понимается экспериментальная проверка заданной конструктором совокупности свойств объекта, проявляемых в необходимых условиях его функционирования, и доработка конструкции и технологии изготовления с целью обеспечения заданной совокупности его свойств. Основу экспериментальной отработки составляют испытания, представляющие собой экспериментальное определение количественных и качественных характеристик свойств объекта испытаний в результате поданных на него воздействий.

По мере целенаправленного совершенствования БС КА увеличивается их надежность и другие характеристики качества, интенсивность отказов при этом снижается, что, в прочем, и составляет одну из основных целей процесса совершенствования космической техники. Однако при этом

значительно сокращается информационная база исходных данных для подтверждения заданных свойств БС. Выходом из данного положения в отдельных случаях могут быть ускоренные испытания на надежность. Однако они имеют ограничения по применимости, так как работают на уровне элементной базы массовых серий и плохо применимы для уникальных и дорогостоящих конструкций.

Перспективным направлением в сложившихся условиях является переход от испытаний физических объектов к испытаниям их имитационных моделей, так называемых «цифровых двойников». При этом методами имитационного моделирования и программными средствами моделируются как сами объекты испытаний, так и подаваемые на них воздействия. Применение технологии автоматизированного имитационного моделирования (АИМ) на основе универсальных пакетов прикладных программ позволяет настраиваться на имитацию любых реальных объектов из заранее определенного класса, значительно сократить продолжительность и стоимость испытаний. Исходными данными для автоматизированного имитационного моделирования традиционно являются данные о характеристиках элементов БС, структуре БС и внешних воздействиях на элементы БС.

Автором проведен анализ существующего технологического и научно-методического задела в предметной области автоматизированного имитационного моделирования испытаний БС КА, в ходе которого выявлено, что несмотря на большое количество работ, посвященных различным аспектам цифрового моделирования функционирования БС КА, в системах АИМ до сих пор слабо используется дополнительная, так называемая «интеллектуальная» информация, содержащаяся в опыте специалистов по созданию, испытаниям и эксплуатации БС КА, которая обычно существует в виде слабо формализованных экспертных знаний в соответствующей предметной области и нуждается в дополнительной формализации для ее эффективного использования. Привлечение такой информации позволило бы повысить достоверность моделирования, в частности за счет верификации

(сопоставления) моделируемых характеристик БС с представлениями эксперта (группы экспертов).

Автор вполне справедливо сделал вывод о существовании противоречия, выражающегося, с одной стороны, в необходимости решения системной проблемы научного обоснования новых технологических решений построения и применения базовых компонент цифровых двойников на основе интеллектуальных имитационных моделей, а с другой стороны - недостаточным уровнем научно-методического обоснования способов формирования таких технологических решений на основе интеграции имитационных моделей, экспертных знаний и фактографических данных.

В этих условиях можно сделать вывод об **актуальности темы** диссертационной работы Исаевой О.С., посвященной разработке технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов. Кроме того, вполне обоснованной выглядит цель диссертационной работы – повышение эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт создания технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов на основе концепции цифровых двойников.

Научная новизна полученных в ходе диссертационного исследования результатов и выносимых на защиту положений заключается в том, что автором:

1. Введено новое понятие «интеллектуальной имитационной модели функционирования бортовой системы», *отличающееся* представлением имитационной модели в виде интегрированной системы имитационного моделирования, объединяющей базы знаний, программно-математические модели технических систем и результаты натурных испытаний. Предложен способ формализации данного понятия, *отличающийся* использованием единого семантического представления информации о характеристиках интегрируемых компонент, что *позволяет* применить формальный подход к созданию цифровых двойников и объединить проблемно ориентированные базы знаний, программно-математические модели бортовых систем и данные

натурных испытаний на основе единого семантического представления элементов бортовой аппаратуры.

2. Разработаны методы построения интеллектуальных имитационных моделей, *отличающиеся* возможностями поддержки построения моделей методами эвристического поиска, формированием баз знаний на основе программ испытаний, возможностями структурно-графического исследования моделей и анализа качества моделирования по результатам испытаний бортовой аппаратуры. Применение методов *позволяет* обеспечить интеграцию базовых компонент цифровых двойников для поддержки проектирования бортовых систем космических аппаратов.

3. Предложены новые методы анализа функционирования БС КА, *отличающиеся* введением процедур поддержки применения цифровых двойников на каждом шаге подготовки и проведения испытаний: для построения сценариев испытаний, анализа полноты испытаний, логики работы бортовых систем, в качестве имитаторов в процессе проведения испытаний, а также для анализа результатов испытаний по прецедентам имитационного моделирования. Разработанные методы *позволяют* обеспечить повышение оперативности и снижения затрат на моделирование за счет комплексного и последовательного применения цифровых двойников на каждом шаге подготовки и проведения испытаний.

4. Впервые предложена технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования БС КА, отличающаяся интеграцией интеллектуальных, информационных и графических методов построения и применения цифровых двойников, что позволяет повысить эффективность процессов проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов в плане повышения достоверности и оперативности моделирования при сокращении соответствующих затрат.

5. Разработаны проблемно-ориентированные системы, отличающиеся применением цифровой технологии имитационного моделирования для поддержки научно-производственных процессов, что позволяет решать новые функциональные задачи формирования баз знаний; построения интеллектуальных моделей функционирования бортовых систем, их

интеграции с программно-математическими моделями технических устройств; накопления и анализа результатов натурных испытаний.

Непротиворечие предложенных в диссертации принципов и концептуальных положений базовым общепринятым основам в предметных областях системного анализа, структурного анализа и проектирования (SADT) сложных объектов исследования, инженерии знаний, интеллектуального имитационного моделирования, концепции цифровой трансформации и цифровых двойников, теории реляционных баз данных, компьютерной поддержки проектирования, изготовления и анализа функционирования сложных технических систем, строгая формулировка частных задач, грамотно подобранные исходные данные для них, применяемые автором апробированные математические методы решения и подтвержденность состоятельности полученных теоретических положений в ходе экспериментальной апробации свидетельствуют о **достоверности** полученных в ходе диссертационного исследования результатов.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается учетом представительного количества факторов, влияющих на решение системной проблемы, обоснованным заданием основных допущений и ограничений при постановке задач, грамотным выбором исходных данных, использованием современного апробированного математического аппарата, корректностью формальных выкладок при разработке методов анализа, кроме того, подтверждается результатами расчетно-экспериментальных работ и сравнением имитационного моделирования бортовых систем космических аппаратов с данными натурального эксперимента.

Теоретическая значимость основных научных результатов, полученных автором, заключается в создании новых научно-обоснованных технологических решений, позволяющих развить технологию и научно-методическое обеспечение автоматизированного имитационного моделирования БС КА на основе разработки и применения комплекса интеллектуальных методов имитационного моделирования и анализа функционирования сложных технических систем путем расширения

информационной базы моделирования в направлении совместного согласованного и взаимоувязанного использования экспертных баз знаний, баз имитационных моделей и баз данных.

Представленные в диссертации результаты имеют высокую *практическую значимость*, которая подтверждается доведением результатов теоретических исследований до уровня технологических решений, адаптированных к особенностям реального проектирования и испытаний БС КА, что способствует их дальнейшему использованию на практике. Кроме того о практической значимости результатов исследований свидетельствует то, что ряд разработанных технологических решений апробирован при проектировании, разработке и испытаниях систем интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования БС КА в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» и в Сибирском федеральном университете, что подтверждено соответствующими актами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Результаты диссертационного исследования были достаточно широко **апробированы** на более чем 20 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах.

Полученные автором лично основные научные результаты и выносимые на защиту положения с достаточной полнотой *опубликованы* в 65 работах, среди которых: 21 статья в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК Минобрнауки РФ, 18 – индексируемых в Scopus, Web of Science, 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 18 статей в рецензируемых изданиях и материалах научных конференций.

Текст автореферата соответствует основному содержанию диссертации. В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведенные исследования, подчеркнута новизна и практическая значимость результатов исследований. Диссертация и автореферат написаны грамотно, стиль изложения доказательный, что позволяет составить целостное представление о

проделанной работе. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и свидетельствует о личном вкладе автора в решение системной проблемы научного обоснования новых технологических решений построения и применения базовых компонент цифровых двойников на основе интеллектуальных имитационных моделей.

Диссертация характеризуется завершенностью решения комплекса задач разработки технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования БС КА. Автор владеет современной методологией научных исследований, обоснованно и корректно применяет соответствующий математический аппарат, обладает широким научным кругозором.

Наряду с указанными достоинствами диссертация имеет и *недостатки*, к числу которых следует отнести:

1. Автором введено новое понятие интеллектуальной имитационной модели функционирования БС КА и предложен новый способ формализации данного понятия. Его основой является единая семантическая платформа представления информации о характеристиках интегрируемых компонент. В работе предложена структура такой платформы, однако состав компонент и технология их информационного взаимодействия описана лишь на самом общем уровне. В наибольшей мере это относится к учету особенностей интеллектуального имитационного моделирования функционирования БС КА не только на начальном этапе жизненного цикла, но и на всех его дальнейших стадиях, включая моделирование эффектов старения, деградации, возникновения нештатных ситуаций на стадии летной эксплуатации в условиях космического пространства и влияния внешних деструктивных воздействий.

2. В работе предложено расширить информационную базу имитационного моделирования функционирования БС КА за счет использования экспертных знаний, интегрируемых в состав моделирующей системы в виде проблемно-ориентированных баз знаний. Очевидно, что на достоверность моделирования функционирования БС КА будут влиять параметры нечетких шкал, применяемые для формализации нечетких

экспертных знаний (число термов нечетких лингвистических шкал, вид и параметры функций принадлежности термов), однако данный вопрос в диссертации не исследован.

3. В диссертации объектом исследования являются бортовые системы космических аппаратов, а предметом исследования – методы информационной поддержки их проектирования, разработки и испытаний с использованием цифровых двойников. На наш взгляд, работа выиграла бы, если в ней, по крайней мере, на описательном уровне в разделе постановки задач исследований были бы рассмотрены особенности имитационного моделирования функционирования орбитальной группировки КА, отдельного КА и затем БС КА с указанием общих подходов и отличий.

4. В диссертации недостаточное внимание уделено формированию требований к организации сбора и обработки исходных данных, необходимых для заполнения баз данных и баз знаний инфраструктуры имитационного моделирования.

5. Оценка степени повышения эффективности проектирования, разработки и испытаний бортовой аппаратуры за счёт создания и внедрения технологии интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования БС КА на основе концепции цифровых двойников, заявленная как цель работы, нуждается в более глубоком анализе, начиная от конкретизации понятия эффективности, до методик ее оценки по результатам применения предложенных в диссертации технологических решений.

Указанные недостатки носят частный характер, не снижают общей высокой оценки проведенных научных исследований и представленных результатов и позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

2. Проведенные диссертационные исследования являются законченной **научно-квалификационной работой**, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие космического потенциала страны и космической отрасли знаний.

3. Диссертация Исаевой Ольги Сергеевны на тему: «Технология интеллектуального имитационного моделирования и анализа функционирования бортовых систем космических аппаратов» **соответствует требованиям ВАК РФ**, а ее автор, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Я, Миронов Андрей Николаевич, 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.

Личные данные официального оппонента: Миронов Андрей Николаевич, почтовый домашний адрес: 197332, г. Санкт-Петербург, Ленинский проспект, д.76, к.1, кв. 795, телефон: +7 (911) 275-08-00, email: mironov-anik@yandex.ru.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ:

Заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники

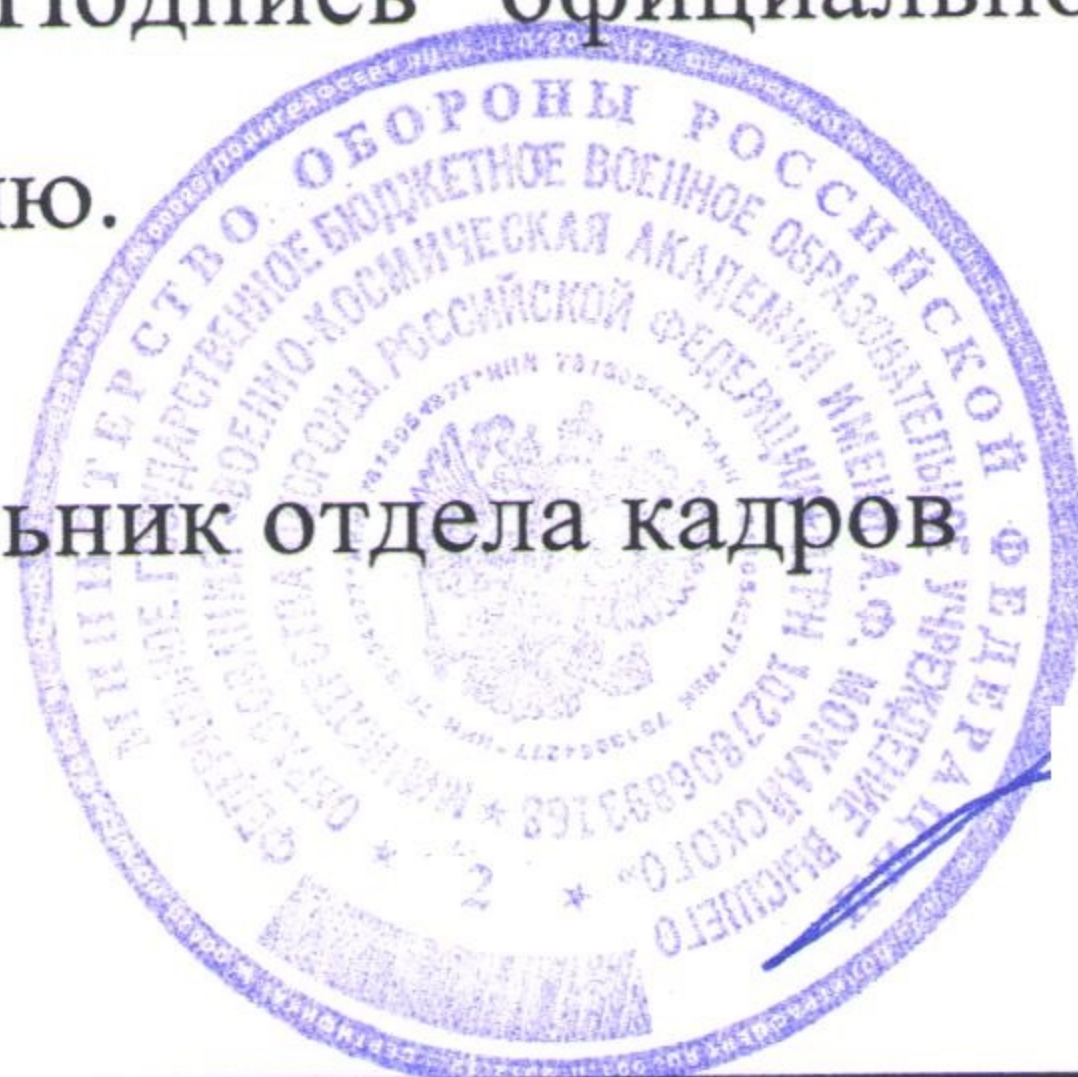
доктор технических наук, профессор

МИРОНОВ Андрей Николаевич

“ 18 “ 01 2022 года.

Подпись официального оппонента Миронова Андрея Николаевича заверяю.

Начальник отдела кадров



ПЛОТНИКОВ Григорий Вячеславович

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13, т. 8 (812) 347-96-13
e-mail: vka@mil.ru