

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Л. Ф. Ноженкова*, О. С. Исаева

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
*E-mail: expert@icm.krasn.ru

Рассмотрено создание предметно-ориентированной среды имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата. Разрабатываемая среда основывается на стандарте Simulation Model Portability (SMP), который определяет технологию достижения совместимости и переносимости имитационных моделей в рамках крупных имитационных проектов сложных программно-технических комплексов.

В мировой космической индустрии существует ряд разработок инфраструктур имитационного моделирования. Они используются в крупных технических проектах, для которых существенную роль играет возможность интегрировать и совместно использовать имитационные модели различного назначения, в том числе разных производителей.

Поддержка импортонезависимости российских космических разработок должна включать создание отечественных программных продуктов, основанных на стандартах Европейского космического агентства. Такие исследования позволят понять принципы организации комплексных проектов и их интеграции в международные исследования.

Разработана архитектура программного обеспечения, предложено разделение на программные подсистемы и описаны основные принципы их взаимодействия. Инфраструктура имитационного моделирования предназначена для поддержки работы конструкторов бортовой аппаратуры космических систем. Ее функции определены на основе анализа основных задач конструирования: поддержка проектирования бортовой аппаратуры, формирование и анализ конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники.

Архитектура содержит все необходимые компоненты для обеспечения интегрируемости и переносимости имитационных моделей между системами имитационного моделирования, построенными по стандарту SMP. Разрабатываемое программное обеспечение расширяет подходы, заложенные в стандарте оригинальными методами информационно-графического и интеллектуального моделирования. Для наглядного построения моделей, задания их структуры и определения связей между элементами разработаны методы и программное обеспечение информационно-графического моделирования. Для задания методов функционирования моделей предлагается использовать condition-action rules. Разработаны специализированные инструменты формирования баз знаний, которые позволяют описать различные варианты поведения моделируемых объектов.

Публикация разработанных подходов и архитектуры программного обеспечения открывает возможности применения SMP другими исследователями в собственных разработках, а также показывает основные технологические моменты, необходимые для выполнения требований стандарта.

Ключевые слова: разработка проблемно-ориентированного программного обеспечения, инфраструктура имитационного моделирования, Simulation Model Portability standard, космический аппарат, бортовая аппаратура, архитектура программного обеспечения.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 538–544

DESIGNING THE PROBLEM-ORIENTED INFRASTRUCTURE FOR SIMULATION MODELING OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT

L. F. Nozhenkova*, O. S. Isaeva

Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
*E-mail: expert@icm.krasn.ru

The authors develop a subject-oriented environment of the spacecraft onboard equipment simulation modeling. This environment is basing on the Simulation Model Portability standard (SMP), which determines the technology for compatibility and transferability of simulation models within big simulation projects of software-and-hardware complexes.

There is a number of simulation infrastructures in the world space industry. They are used in big technical projects where it is important to integrate simulation models of different purpose, including those of different manufacturers, and to use them together.

The support for the import-independence of Russian space developments should include the creation of domestic software products based on the standards of the European Space Agency. Such studies will make it possible to understand the principles of organization of complex projects and their integration into international research. We have designed a software architecture, proposed a division in software subsystems and described the main principles of their interaction. Simulation infrastructure is aimed to support the work of the space systems' onboard equipment designers. Its functions are determined by the basic tasks of the constructing: onboard equipment design support, generation and analysis of designer solutions at different stages of the space equipment production lifecycle.

The architecture contains all the necessary components to provide transferability and workability of simulation models in the simulation modeling systems built on the basis of the SMP Standard. Our software extends the approaches provided by the standard with the original methods of information-graphic and intellectual modeling.

The authors have developed the methods and software of information-and-graphic modeling for visual building of the models, setting their structure and determining the links between their elements. To specify the methods of functioning of models, the authors suggest using condition-action rules. Our special instruments of knowledge base creation allow describing different variants of the modeled object behavior.

The publication of the developed approaches and the software architecture opens up the possibilities of using SMP by other researchers in their own development, and also shows the main technological moments which are necessary to meet the requirements of the standard.

Keywords: developing problem-oriented software, simulation infrastructure, simulation model portability standard, spacecraft, onboard equipment, software architecture.

Введение. Координация исследований в области космического приборостроения требует создания унифицированных технологий имитационного моделирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Такие технологии должны основываться на применении международных стандартов, обеспечивающих переносимость и интегрируемость имитационных моделей бортовых устройств. В мировой практике для этих целей успешно используется стандарт Европейского космического агентства Simulation Model Portability (SMP2) [1; 2]. Для крупных имитационных проектов сложных программно-технических комплексов мировые лидеры космической отрасли развивают собственные инфраструктуры имитационного моделирования, основанные на SMP2. Инфраструктура имитационного моделирования представляет собой инструментальную среду, позволяющую создавать и интегрировать имитационные модели технических устройств. Стандарт SMP2 задает универсальные подходы к организации систем моделирования, обеспечению совместимости и переносимости имитационных моделей между различными имитационными окружениями. Однако за рамками стандарта остаются технологические аспекты построения инфраструктур. В то время как за рубежом ведутся интенсивные исследования в этом направлении, в нашей стране наблюдается значительное отставание. Научная значимость проведенного авторами исследования состоит в том, что полученные результаты позволяют существенно восполнить этот пробел. Разработанная технология построения архитектуры инфраструктуры имитационного моделирования, с одной стороны, удовлетворяет требованиям унификации, изложенным в стандарте SMP2, с другой стороны, расширяет возможности построения моделей за счет средств информационно-графического и интеллектуального моделирования.

К наиболее известным в мире инфраструктурам имитационного моделирования относятся SimTG – Astrium Satellites [3], SimSAT – European Space Agency [4], симулятор Европейского центра управления полетами SWARMSIM [5]. Инфраструктуры имитационного моделирования используются в крупных технических проектах, для которых существенную роль играет возможность интеграции и совместного использования имитационных моделей различного назначения. Применение стандарта SMP2 открывает широкие возможности для построения и использования сложных, многокомпонентных имитационных моделей [6; 7]. Интересный пример использования стандарта SMP был реализован в крупном научно-исследовательском проекте MERLIN [8], заключающемся в разработке спутников дистанционного зондирования для мониторинга парникового газа. Уникальность проекта заключается в интеграции имитационных моделей, разрабатываемых исследователями на четырех различных SMP-платформах имитационного моделирования. Применение SMP позволило объединить имитационные модели от Airbus, CNES и Thales Alenia Space, выполнив стандартизацию всех компонентов пространственной системы, сделать их более надежными, снизить затраты и оптимизировать график разработки.

Положительный опыт мировых исследований показывает актуальность развития технологий имитационного моделирования на основе стандарта SMP2. Для поддержки импортонезависимости российских космических разработок требуется проводить всесторонние исследования, направленные на создание отечественных технологий и инструментальных сред, поддерживающих методы переносимости и интегрируемости моделей. Такие исследования позволяют развивать принципы организации комплексных космических проектов и их интеграцию в международные исследования.

В статье предложена технология создания оригинальной инфраструктуры имитационного моделирования, позволяющей выполнять имитационное моделирование функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата [9]. Стандарт задает общие принципы описания интерфейсов моделей и регламентирует функциональность программных модулей, составляющих ядро инфраструктуры моделирования, однако он оставляет нерешенным ряд вопросов построения, моделирования, обеспечения интеграции и взаимодействия моделей, которые решаются разработчиками программных систем самостоятельно. Предложены технологические принципы реализации заложенных в SMP2 архитектурных требований к инструментальной среде, дополненные оригинальными элементами информационно-графического и интеллектуального моделирования [10]. Собственные технологические подходы [11; 12] позволили авторам обеспечить возможность использования моделей в различных проектах и на различных имитаторах с учетом специфики задач моделирования бортовых систем космических аппаратов. Предложенная архитектура инфраструктуры имитационного моделирования содержит совокупность важнейших решений по организации программной среды, определяет выбор структурных элементов, способных обеспечить построение, функционирование и интеграцию моделей технических устройств. Технология построения инфраструктуры содержит расширение унифицированных подходов к представлению SMP2-моделей средствами построения и использования семантических конструкций предметной области и баз знаний, описывающих логику работы моделей. Предложенная технология позволяет создать проблемно-ориентированную среду, предоставляющую удобные инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования и в то же время поддерживающую совместимость имитационных моделей и их переносимость между различными инфраструктурами.

Назначение и функции инфраструктуры имитационного моделирования. Инфраструктура имитационного моделирования предназначена для поддержки работы конструкторов бортовой аппаратуры космических систем. Ее функции определяются основными задачами конструирования: поддержка проектирования бортовой аппаратуры, формирование и анализ конструкторских решений на различных этапах жизненного цикла производства космической техники. Программные инструменты, необходимые для решения этих задач, должны быть предметно ориентированы, визуальны и удобны для работы специалистов предметной области без применения специальных навыков программирования. Конструктор бортовой аппаратуры должен иметь возможность строить модели функционирования космических систем, применяя готовые модели оборудования различных производителей или создавая собственные, выполнять интеграцию и задание методов взаимодействия моделей, подготавливать сценарии, проводить имитационные эксперименты, выполнять анализ и просматривать результаты моделирования.

Для наглядного построения моделей, задания их структуры и определения связей между элементами авторы разработали методы и программное обеспечение информационно-графического моделирования. Инструменты позволяют конструктору оперировать привычными семантическими конструкциями для построения моделей функционирования бортовой аппаратуры. Методы функционирования моделей задаются в виде правил (condition-action rules) [13]. Специализированные инструменты формирования баз знаний [14], разработанные авторами, позволяют описать различные варианты поведения моделируемых объектов. Разработанные оригинальные инструменты прошли апробацию и позволили построить модели функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата [15]. Внедрение их в инфраструктуру имитационного моделирования расширит возможности построения моделей и обеспечит их переносимость и интегрируемость в комплексные решения. Инфраструктура должна содержать как программные компоненты, спецификации, имитационные модели и результаты экспериментов, так и базы знаний, консолидирующие знания и опыт экспертов по созданию бортовой аппаратуры космических систем.

Для реализации технологии построения комплексной модели бортовой аппаратуры требуется выполнить проектирование комплексной модели, реализацию моделей на основе правил, импорт готовых SMP-моделей сторонних производителей, интеграцию моделей в комплексную модель, подготовку к проведению моделирования, проведение имитационных экспериментов, анализ и визуализацию результатов моделирования (рис. 1).

Выделение функциональных задач технологии построения комплексной модели бортовой аппаратуры позволило определить основные программные модули, необходимые для их решения: инструменты информационно-графического моделирования, подсистема интеграции, редактор правил, редактор модели и редактор сценариев, имитационное ядро, включающее подсистемы управления временем, менеджер событий, подсистема логирования, механизмы имитационного моделирования анализа и выполнения правил, обозреватель результатов. Каждая из указанных подсистем представляет собой специализированный инструмент, предоставляющий расширенные возможности для решения задач. Высокий уровень проблемной ориентации обеспечивается за счет инструментов графического моделирования и редактора правил. Проблемная ориентация упростит использование готового программного обеспечения и построенных моделей конструкторами бортовой аппаратуры. Реализация отдельных программных подсистем в виде единого решения представляет сквозную технологию моделирования и анализа функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

Архитектура инфраструктуры моделирования бортовой аппаратуры. Разработана архитектура программного обеспечения, предназначенного для имитационного моделирования бортовой аппаратуры

космического аппарата (рис. 2). Требования к функционалу и дизайну определены, исходя из назначения системы, особенностей объекта моделирования и квалификации специалистов проблемной области. Определены программные подсистемы, необходимые для построения моделей, их интеграции и проведения имитационных экспериментов. Ядро имитационного моделирования обеспечивает как функциональность, заложенную в стандарте SMP2, так и оригинальные программные инструменты.

Центральным элементом инфраструктуры имитационного моделирования является банк моделей и сценариев. Он обеспечивает единое информационное пространство для построения и использования моделей, целостность и контроль версий и служит инструментом коллективной разработки крупных моделей сложных технических объектов.

Для поддержки централизованной работы с банком моделей программное обеспечение инфраструктуры имитационного моделирования разделено на серверную и клиентскую части.

Серверная часть инфраструктуры обеспечивает доступ к централизованному хранилищу данных: банку моделей, сценариев и результатов имитационных экспериментов. В состав серверной части входят подсистемы доступа к данным и логирования, которые обеспечивают взаимодействие с базой данных и файловым хранилищем. Механизмы контроля версий и синхронизации позволят конструкторам бортовой аппаратуры на рабочих местах дорабатывать и дополнять имитационные модели. Это особенно актуально в масштабах большого предприятия, где разработкой отдельных подсистем и их моделей занимаются различные структурные подразделения.

Клиентская часть программного обеспечения предназначена для функционирования на рабочих местах конструкторов бортовой аппаратуры. Она позволяет конструктору решать все возникающие при моделировании задачи. Конструктор может использовать редактор моделей, подсистему построения правил и подсистему интеграции моделей в стандарте SMP2.

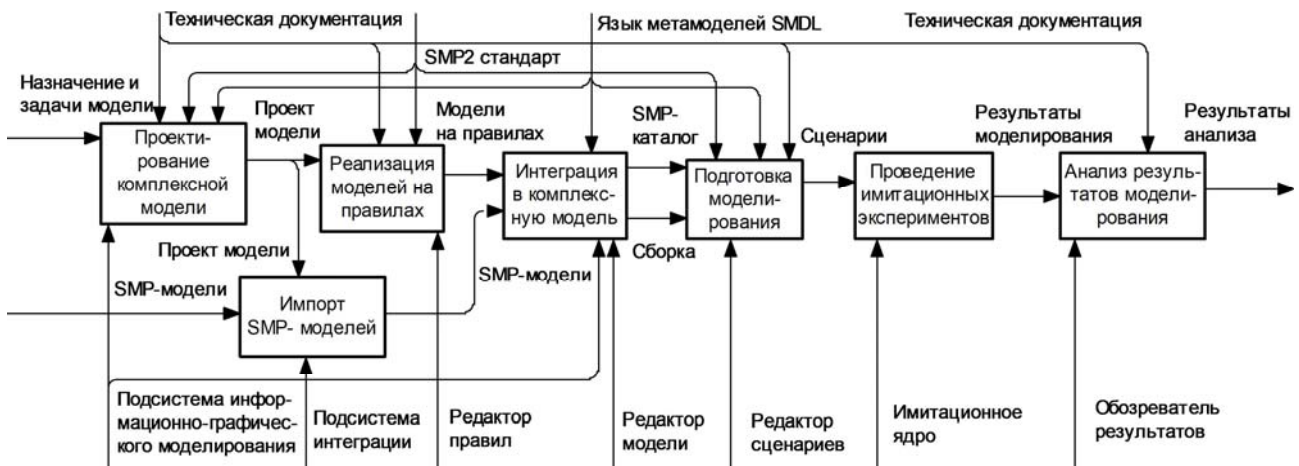


Рис. 1. Технология построения комплексной модели бортовой аппаратуры

Fig. 1. Technology of building a complex model of on-board equipment

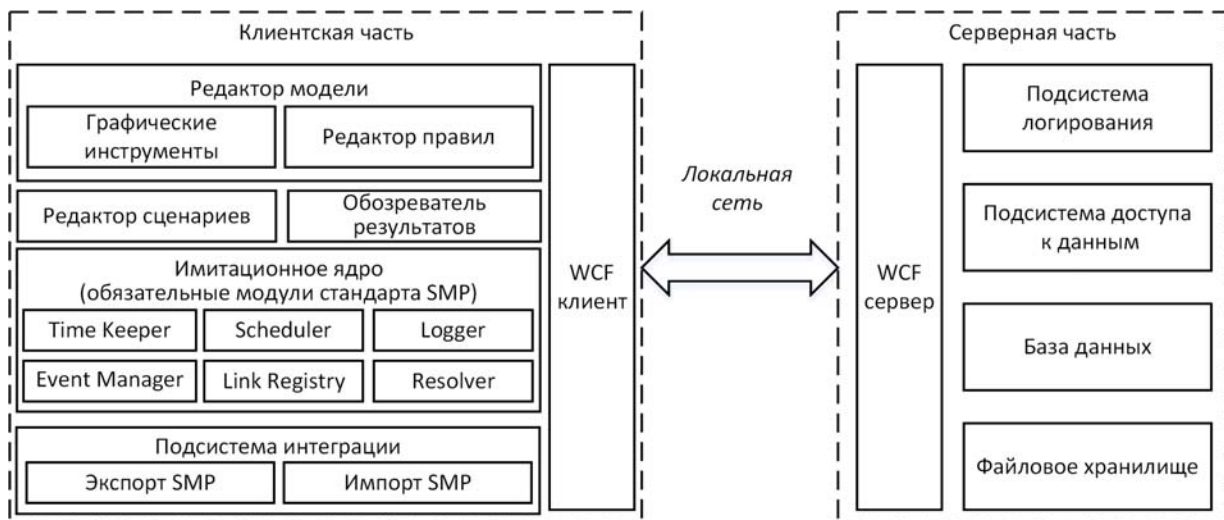


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения инфраструктуры

Fig. 2. Architecture of software infrastructure

Ядро инфраструктуры имитационного моделирования содержит все необходимые модули, заданные в стандарте SMP2. На рис. 2 наименования модулей приведены в соответствии со стандартом: Time Keeper, Scheduler, Logger, Event Manager, Link Registry, Resolver. Time Keeper (хронометр) управляет временем моделирования. Этот модуль поддерживает абсолютное и проектное время моделирования. Все модели синхронизируются и выполняются, запрашивая время и изменяя время. Наличие хронометра позволяет обеспечивать различные режимы моделирования: режим реального времени, ускоренный, максимально быстрый, пошаговый. Scheduler (планировщик) управляет выполнением событий, запускает входные точки модели, добавляет или удаляет события, контролирует счетчик повторений и время между повторениями для событий. Logger (модуль протоколирования) обеспечивает отправку сообщений в имитационный протокол для всех объектов в имитаторе. Event Manager (менеджер событий) обеспечивает глобальный механизм уведомлений в соответствии с входными точками, связанными с глобальными событиями. Link Registry (регистрация связей) поддерживает список связей между компонентами, возвращает коллекцию всех компонентов, которые имеют связь с целевым компонентом. Модуль регистрации связей используется для удаления объектов из модели. Resolver поддерживает ссылки на компоненты по имени либо по полному или относительному пути.

Редактор моделей включает подсистему информационно-графического моделирования и редактор правил. Редактор предоставляет инструменты графического моделирования для визуального отображения структуры моделируемой системы, моделей подсистем и связей между ними. В редактор моделей входит подсистема построения сборки, являющаяся обязательной в стандарте SMP2. Подсистема сборки позволяет создавать комплексные модели, определяя основные и резервные реализации моделей оборудования, входов, выходов и связей между моделями. Дополнительно в нашей реализации подсистема сборки обеспечивает интеграцию моделей в формате SMP2 с моделями, основанными на правилах [16]. Подсистема построения правил содержит инструменты для описания поведения элементов модели и их реакций на входные воздействия. Подсистема правил представляет собой интеллектуальный конструктор, который предлагает пользователю выбирать допустимые действия или операции в зависимости от структуры и элементов правила.

Наличие в инфраструктуре графического редактора моделей и подсистемы правил выгодно отличает разрабатываемую инфраструктуру от существующих. Графические и интеллектуальные инструменты позволяют инженеру-конструктору строить модели космических систем, оперируя терминами и понятиями предметной области, обеспечивают удобство работы и минимизируют возможность ошибки. Такой подход способствует формированию и накоплению знаний о методах функционирования бортовой аппаратуры космических систем.

В стандарте SMP2 модель описывается на языке Simulation Model Definition Language (SMDL) [17]. Это формальный язык представления моделей, который понимается всеми инфраструктурами имитационного моделирования. В нашей инфраструктуре подсистема интеграции выполняет автоматическую интерпретацию моделей в SMDL-описании, дополняя ее структурами и механизмами, поддерживаемыми в инфраструктуре имитационного моделирования. При экспорте модели подсистема формирует выходные файлы, включающие метамодель, библиотеки моделирования, конфигурационные файлы. В отличие от существующих инфраструктур, для импорта и экспорта моделей в формат SMP2 пользователю не потребуется знание не только специализированного языка моделирования SMDL, но и дополнительных навыков программирования. Подсистема включает в себя инструменты, позволяющие через графический интерфейс настраивать параметры импорта и экспорта моделей.

Для подготовки имитационных экспериментов предназначена подсистема построения сценариев. Эксперименты могут отражать различные условия работы моделируемой системы. Для каждой модели может быть построено произвольное число сценариев имитационного моделирования. В инфраструктуре поддерживается принцип отделения знаний о методах функционирования моделей от их использования. Реализуется данный принцип как на уровне методов логического вывода в базах знаний, так и на уровне формирования и выполнения сценариев моделирования. Модель и построенные для ее испытаний сценарии могут редактироваться независимо. Поддерживается версионность моделей и сценариев. Система контроля версий отслеживает совместимость моделей, используемых в сценарии, и при существенном изменении сохраняет актуальные варианты моделей. Такой подход расширяет возможности проведения имитационных экспериментов и предоставляет гибкие механизмы отладки моделей.

Ядро программного обеспечения спроектировано так, что позволяет выполнять модели на основе стандарта SMP, а также модели, построенные на основе базы правил. Ядро имитационного моделирования позволяет управлять скоростью и ходом проведения имитационных экспериментов. В его задачи входят сбор информации о функционировании модели в процессе выполнения имитационного эксперимента, контроль очередности передачи сообщений между блоками модели и изменения их внутреннего состояния. Заложенные в функции ядра механизмы следят за изменением всех параметров модели и сохраняют их на сервере. Сохраненные данные позволяют выполнять ретроспективный анализ имитационных экспериментов.

Реализация описанных в архитектуре программного обеспечения функциональных подсистем в инфраструктуре имитационного моделирования позволяет создавать, переносить, интегрировать и совместно использовать имитационные модели различного назначения, в том числе разных производителей.

Заключение. Предложена технология построения инфраструктуры имитационного моделирования, позволяющая создавать инструментальные средства для построения, выполнения и интеграции имитационных моделей функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Технология задает общие принципы создания имитационных инфраструктур на основе стандарта SMP2 и может быть использована для различных научных проектов.

Разработана архитектура инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата, которая содержит компоненты для обеспечения интегрируемости и переносимости имитационных моделей между системами имитационного моделирования. Дополнение унифицированных моделей базами знаний и семантическими конструкциями предметной области обеспечивает формирование, сохранение и тиражирование уникального опыта и знаний специалистов-конструкторов бортовой аппаратуры космических систем.

Построенная на основе предложенной технологии предметно-ориентированная инфраструктура способна поддерживать совместимость и переносимость имитационных моделей между различными инфраструктурами, предоставляя удобные инструменты информационно-графического и интеллектуального моделирования. Применение инфраструктуры имитационного моделирования обеспечит возможность создания моделей бортовых систем космических аппаратов, разработки сценариев моделирования, проведения имитационных экспериментов и анализа их результатов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-41-242042.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR and the government of Krasnoyarsk region according to the research project № 16-41-242042.

Библиографические ссылки

1. ECSS E-40-07. Simulation modelling platform. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. Netherlands, 2011. 49 p.
2. SMP 2.0 Handbook, EGOS-SIM-GEN-TN-0099. Darmstadt, Germany, 2005. Iss. 1.2. 134 p.
3. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 Standard within SimTG Simulation Infrastructure // Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012. 14 p.
4. Simsat 3.0: Esoc's New Simulation Infrastructure / J. Eggleston [et al.] // 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations. 2005. 29 p.
5. Fritzen P., Segneri D., Pignède M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC. The role of computational steering in space engineering activities assisted by modelling and simulation. São José dos Campos : INPE, 2014. P. 217–221.
6. Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic

model transfer / W. F. Lammen [et al.] ; Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk, 2016. 20 p.

7. Lammen W. F. MOSAIC 11.0: User Manual, NLR-CR 2015-524 / Netherlands Aerospace Centre. Amsterdam, 2016. 22 p.

8. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission / A. Strzepek [et al.] // 14th Intern. Conf. on Space Operations. 2016. P. 11. DOI: 10.2514/6.2016-2410.

9. Моделирование и анализ функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата / О. С. Исаева [и др.] // Информатизация и связь. 2015. № 1. С. 58–64.

10. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the Simulation Model Portability standard / L. F. Nozhenkova [и др.] // Advances in Intelligent Systems Research. 2016. Vol. 133. P. 481–484. DOI: 10.2991/aiie-16.2016.111.

11. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure / L. F. Nozhenkova [et al.] // Proceedings of the 2016 Intern. Conf. on Electrical Engineering and Automation (ICEEA2016). 2016. P. 618–622. DOI: 10.12783/dtetr/iceea2016/6728.

12. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Проектирование и разработка программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 2(54). С. 114–119.

13. Luger G. F. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6th Ed. Boston : Pearson Education, 2009. 754 p.

14. Исаева О. С., Грузенко Е. А. Эвристический метод построения модели функционирования командно-измерительной системы космического аппарата // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 28–37.

15. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 33–44.

16. Компоненты унификации модели бортовой аппаратуры космического аппарата / Л. Ф. Ноженкова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 11-2. С. 284–288.

17. Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07 // ESA Requirements and Standards Division ESTEC. Netherlands, 2011. 169 p.

References

1. ECSS E-40-07. Simulation modelling platform. ESA Requirements and Standards Division ESTEC. The Netherlands, 2011, 49 p.
2. SMP 2.0 Handbook, EGOS-SIM-GEN-TN-0099. Germany, Darmstadt. 2005, Issue 1.2, 134 p.
3. Cazenave C., Arrouy W. Implementing SMP2 Standard within SimTG Simulation Infrastructure: Simulation and EGSE for Space Programmes. 2012, 14 p.
4. Eggleston J., Boyer H., Zee D., Pidgeon A., Nisio N., Burro F., Lindman N. Simsat 3.0: Esoc's New Simulation

Infrastructure. *6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations*. 2005, 29 p.

5. Fritzen P., Segneri D., Pignède M. SWARMSIM – The first fully SMP2 based Simulator for ESOC: *The role of computational steering in space engineering activities assisted by modelling and simulation*. São José dos Campos: INPE. 2014, P. 217–221.

6. Lammen W. F., Jaffry D., Moelands J. M., Wijnands Q. *Connecting MATLAB to the SMP2 Standard. Harmonizing new and traditional approaches for automatic model transfer*. Netherlands Aerospace Centre. ESTEC Noordwijk. 2016, 20 p.

7. Lammen W. F. *MOSAIC 11.0: User Manual, NLR-CR 2015-524*. Amsterdam, Netherlands Aerospace Centre, 2016, 22 p.

8. Strzepek A., Esteve F., Salas S., Millet B., Darnes H. A training, operations and maintenance simulator made to serve the MERLIN mission. *14th International Conference on Space Operations*. 2016, P. 11. DOI: 10.2514/6.2016-2410.

9. Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Vogorovskiy R. V., Koldyrev A. Yu. [Modeling and analysis of functioning of the spacecraft command and measuring system]. *Informatizatsiya i svyaz*, 2015. No 1. P. 58–64 (In Russ.).

10. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu., Markov A. A., Belorussov A. I., Vogorovskiy R. V. Unified description of the onboard equipment model on the basis of the “Simulation Model Portability” standard. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2016, Vol. 133, P. 481–484. DOI: 10.2991/aiie-16.2016.111.

11. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Koldyrev A. Yu. Integration technology of the onboard equipment simulation models in simulation modeling infrastructure. *Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical Engineering and Automation*

(ICEEA2016). 2016, P. 618–622. DOI: 10.12783/dtetr/iceea2016/6728.

12. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [Designing and constructing the program-mathematical model for the spacecraft command and measuring system]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2(54), P. 114–119 (In Russ.).

13. Luger G. F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving* (6th Edition). Boston, Pearson Education, 2009, 754 p.

14. Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [Heuristic method of constructing a model of spacecraft command and measuring system]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*. 2016, No. 4–2, P. 28–37 (In Russ.).

15. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [The method for system modelling of the spacecraft on-board equipment]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2015, Vol. 20, No. 3, P. 33–44 (In Russ.).

16. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A., Belorussov A. I. [Components model unification onboard equipment spacecraft]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016, No. 11–2, P. 284–288 (In Russ.).

17. *Simulation modelling platform – Volume 2a: Metamodel. ECSS E-40-07*. ESA Requirements and Standards Division ESTEC, The Netherlands, 2011, 169 p.