

УДК 004.422

doi: 10.53816/20753608_2025_3_48

**РАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ
СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**EFFICIENT APPROACH FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE COMPUTER
MODELING SYSTEM COMPOSITION**

*К.И. Сыпало¹, чл.-корр. РАРАН В.А. Нестеров², М.Н. Правидло²,
П.А. Бирюков³, С.В. Пушкин³*

¹ ЦАГИ, ² МАИ, ³ ГосМКБ «Вымпел»

K.I. Syvalo, V.A. Nesterov, M.N. Pravidlo, P.A. Biryukov, S.V. Pushkin

Рассмотрены принципы построения системы имитационного компьютерного моделирования с применением оригинальных средств автоматизации подготовки исходных данных и распараллеливания расчетов, особенности построения и разработки компьютерных моделей в виде иерархии цифровых двойников и цифровых фракталов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, цифровой двойник, цифровой фрактал, распараллеливание вычислений.

The issue of organizing the computer modeling system (CMS) composition using the interprocess communication of computer model and model running dispatcher is considered. CMS include computer model and automation service facilities, such as process running dispatcher, initial data preparation module, results analysis module. The computer model structure is based on digital twins and digital fractals hierarchy.

Keywords: computer modeling, digital tween, digital fractal, parallel computations.

**Существующая технология применения
имитационного моделирования
и перспективы ее совершенствования**

При проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР, ОКР) связанных с разработкой и испытаниями беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), неотъемлемой частью является математическое моделирование (ММ) с использованием цифровых компьютерных моделей (КМ) [1–3]. Применение ММ позволяет получить результаты, часто недостижимые на ранних стадиях ОКР или требующие больших затрат на этапах натурных испы-

таний. В настоящее время отмечается недостаточное использование методов системного проектирования и моделирования на всех этапах ОКР [4]. Рассматриваемая в статье технология является вариантом развития методов ММ, которые применимы к задачам проектирования БПЛА и других объектов.

В статье рассматриваются КМ, разрабатываемые на основе универсальных языков программирования. Важнейшими требованиями к КМ являются высокая степень адекватности разрабатываемому БПЛА, а также возможность быстрой модификации, т.к. в процессе ОКР происходит многократная доработка объекта и его частей.

Первое требование возможно реализовать путем создания функциональных цифровых двойников (ЦД) разрабатываемого объекта или его частей. Второе требование приводит к необходимости использования особых подходов к разработке КМ, что подробно рассмотрено далее.

Разработка КМ в виде функционального ЦД требует высокой квалификации разработчиков КМ, особенно при стремлении вписать время разработки и расчетов в приемлемые рамки, диктуемые производственными и экономическими требованиями. Отсюда следует актуальность рассмотрения технологий построения КМ, обеспечивающих удобство разработки коллективом разработчиков, простоту использования, функциональность, модифицируемость и надёжность при сокращении затрат на разработку КМ и проведение исследований образца методами математического моделирования.

Зачастую КМ используется в процессе имитационного моделирования (ИМ), в котором требуемый результат формируется в виде статистических оценок, получаемых в результате многократного выполнения расчетов на КМ с разными исходными данными. Независимо от варианта использования и построения КМ, математическое моделирование требует многократной модификации КМ в процессе проведения ОКР — корректировки параметров, замены составных частей (ЦД подсистем) объекта-прототипа.

Учитывая большой объем проводимых расчетов, важным аспектом процесса ИМ является возможность автоматизации проведения расчетов и анализа результатов моделирования при огромном объеме исходных данных (или их вариантов).

Рассматривая методы разработки КМ можно отметить ряд принципиальных недостатков в существующих технологиях:

- большая трудоемкость полной разработки КМ, ориентированной на локальную задачу;
- сложность организации универсального интерфейса с оператором;
- уникальность системы исходных данных и вывода результатов;
- как правило, невозможность внедрения в КМ программных кодов из состава специального программного обеспечения объекта-прототипа;
- отсутствие средств автоматизации расчетов и обработки результатов;

– большая трудоемкость или невозможность адаптации программных кодов КМ для другой задачи.

Проблемы, связанные с документированием, отладкой, тестированием, верификацией и валидацией КМ всегда присутствуют при разработке КМ и далее подробно не рассматриваются, хотя частично устраняются в разработанной программной технологии.

Попытка устранить все вышеуказанные недостатки зачастую приводит к противоречию между требованиями к функциональности КМ и трудозатратам на разработку КМ при одновременном требовании снижения трудозатрат на проведение ИМ.

В рамках предлагаемой технологии разработки КМ и проведения ИМ устранение отмеченных недостатков реализуется на основе следующих подходов:

- унификация структуры исходных данных и результатов расчетов;
- разработка иерархической программной архитектуры, обеспечивающей удобство разработки, модификации и эксплуатации КМ;
- использование понятия вычислительного модуля для реализации вычислительного алгоритма КМ;
- разработка средств автоматизации управления исходными данными, анализа результатов и распараллеливания расчетов.

Массовые расчеты при имитационном моделировании

Проведение имитационного моделирования предполагает выполнение многочисленных прогонов КМ (массовых расчетов), при которых формируются отдельные реализации для стохастических переменных. Иногда требуется подбор параметров для стохастических переменных в системах, природа которых исследуется. Все это требует большого объема работ при проведении ИМ и возможной неоднократной модификации КМ. Таким образом, при проведении ИМ выполняется несколько трудоемких этапов работ:

- формирование и контроль многочисленных наборов исходных данных;
- выполнение массовых расчетов на основе полученных наборов исходных данных;

- подготовка результатов моделирования для статистической обработки;
- выполнение статистической обработки результатов;
- анализ полученных результатов с точки зрения адекватности КМ и объекта-прототипа;
- возможная модификация алгоритмов или параметров КМ и повторное выполнение вышеописанных этапов.

Ряд перечисленных этапов может быть автоматизирован с помощью отдельных универсальных программных средств, однако зачастую это ведет к излишним трудозатратам. Специфика выполнения массовых расчетов предполагает использование КМ как программной единицы в некотором окружении, обеспечивающем удобство работы оператора, протоколирование работы, накопление исходных данных и систематизацию результатов.

Общая структура моделирующей системы для выполнения массовых расчетов показана на рис. 1. Оператор определяет последовательность расчетов и формирует команды для программы графического пользовательского интерфейса (ГПИ), которые отражаются в протоколе расчетной сессии. ГПИ представляет собой автономное приложение, которое управляет запуском КМ и имеет возможность работы с файлами исходных данных и файлами результатов. ГПИ позволяет генерировать серии файлов исходных данных с вариацией выбранных параметров исходных данных [5].

Банк конфигураций содержит шаблоны исходных данных (ИД), которые позволяют в зависимости от выбранной задачи быстро создать базовый набор исходных данных для данной КМ. На основе базового набора ГПИ формирует

наборы ИД с вариацией параметров для проведения серий расчетов. Вариация параметров может производиться по множеству параметров различного типа, при этом в автоматическом режиме могут создаваться сотни и тысячи наборов исходных данных, что исключает ошибки оператора при подготовке данных. При необходимости, возможно ручное создание и корректировка файла исходных данных. Однако использование ГПИ гарантирует целостность и корректность вариантов данных в файлах ИД.

Формируемые в КМ результаты расчетов сохраняются в файлах унифицированного формата и могут отображаться в ГПИ, в том числе «на лету», в процессе выполнения расчетов. Входные и выходные файлы КМ могут распределяться по различным местам хранения в зависимости от расчетной задачи, обеспечивая упорядочивание результатов и автоматизацию сбора итоговых данных. Протоколирование работы ГПИ позволяет создавать журнал текущей работы, отражающий обработанные варианты и их результат (нормальное или аварийное завершение и др.).

Управляющие действия оператора ГПИ сводятся к выбору/корректировке базового набора исходных данных, формированию вариаций исходных данных и выбору варианта рабочей программы КМ. Последовательность запуска программы КМ определяется схемой расчетов, формируемой на основе исходных данных и заданного оператором режима работы ГПИ.

Средства автоматизации подготовки исходных данных требуют унификации формы представления исходных данных. Это возможно выполнить на основе формирования унифицированного формата представления исходных данных. Такой формат файла исходных данных разработан на основе требований обеспечения универсальности, наглядности и, при необходимости, скрытности описаний в ИД. Унифицированный формат обеспечивает хранение исходных данных, загрузку данных в КМ библиотечными программами, также имеется возможность просмотра и модификации данных оператором или средствами автоматизации.

Каждый вариант исходных данных представляется в виде отдельного файла. Универсальность исходных данных обеспечивается поддержкой форматов данных практически любого

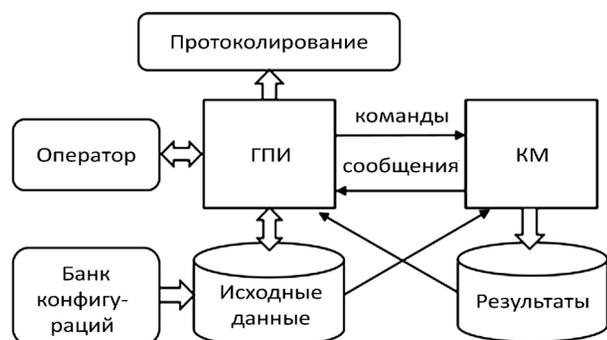


Рис. 1. Структурная схема моделирующей системы

типа: целых, с плавающей точкой, текстовых, битовых и др.

Наглядность исходных данных обеспечивается формой представления в виде текстового файла, содержащего сами данные и комментарии к ним, которые могут отображаться программой формирования/корректировки ИД.

Скрытность исходных данных обеспечивается возможностью формирования файлов ИД без комментариев и дополнительной смысловой информации или записью файла ИД в двоичном (неформатированном) виде.

Средства автоматизации анализа результатов сильно зависят от формы представления результатов. Однако, наиболее часто используемые формы в виде таблиц позволяют автоматизировать формирование 2D или 3D-графиков. Построение графиков в настоящее время не вызывает трудностей и может выполняться средствами ГПИ или сторонними программами. Если в КМ предусмотрен вывод итоговых данных в специальном формате, ГПИ обеспечивает автоматический сбор итоговой таблицы по множеству вариантов расчетов. Дальнейшая статистическая обработка итоговой таблицы может выполняться табличными процессорами.

Особенности архитектуры компьютерных моделей для выполнения массовых расчетов

Основой рассматриваемой архитектуры является разделение всей КМ на две основные функциональные части: вычислительный модуль и сервисы, а также структуризация программного кода вычислительного модуля (ВМ) на иерархическом принципе.

Обобщенная программная архитектура КМ представлена на рис. 2. КМ состоит из вычислительного модуля, взаимодействующего с сервисными модулями — группами программ, выполняющими все функции связи с оператором, входными и выходными файлами, таблицами состояния атмосферы и другими источниками универсальных данных, используемыми в неизменном виде многими программами-потребителями.

ВМ представляет собой реализацию расчетных алгоритмов ММ. Сервис главного диспетчера ДИСП выступает в роли главной управля-

ющей программы, обеспечивающей обработку команд от оператора или других источников команд и запуск расчетов в нужном режиме. Остальные сервисы обеспечивают обработку запросов от ВМ и ДИСП.

Сервис автоматизации расчетов позволяет организовать массовый счет — автоматизированную обработку большого числа вариантов исходных данных, с использованием распределенной вычислительной сети.

Сервис конфигурации формирует рабочее пространство и выделение ресурсов для КМ в зависимости от требований сценария обработки и варианта исходных данных.

Сервис ИД позволяет автоматически выбирать файлы исходных данных для выбранного сценария обработки и загружать данные в рабочую область КМ.

Сервис вывода позволяет организовать вывод результатов в нужном формате, в заданные файлы и определенные места хранения, также определяемые сценарием обработки.

Сервисы событий, атмосферы (Атм) и другие, не показанные на рис. 2, обеспечивают реакцию КМ на события, возникающие в ВМ (аварийный останов, запросы к оператору и пр.) и предоставляют ВМ типовые или известные заранее информационные ресурсы, например, параметры атмосферы, случайные последовательности чисел.

Сложность построения КМ в значительной степени диктуется требованиями нормативных документов, касающихся вопросов разработки изделий военного и специального назначения, а именно требованиями верификации и валидации КМ. Одним из способов решения такой задачи является деление рабочих алгоритмов КМ на составные части путем структурирования, которое использует понятие цифрового двойника как виртуальной модели физического объекта [6]. Построение ЦД составных частей изделия также позволяет упростить задачу верификации и валидации КМ, в том числе с использованием программного кода, встраиваемого в готовый объект-прототип. Поскольку понятие ЦД достаточно обширное, далее рассматривается его упрощенный вариант в виде функционального ЦД, отражающего процессы функционирования объекта-прототипа на различных этапах разработки и испытаний.

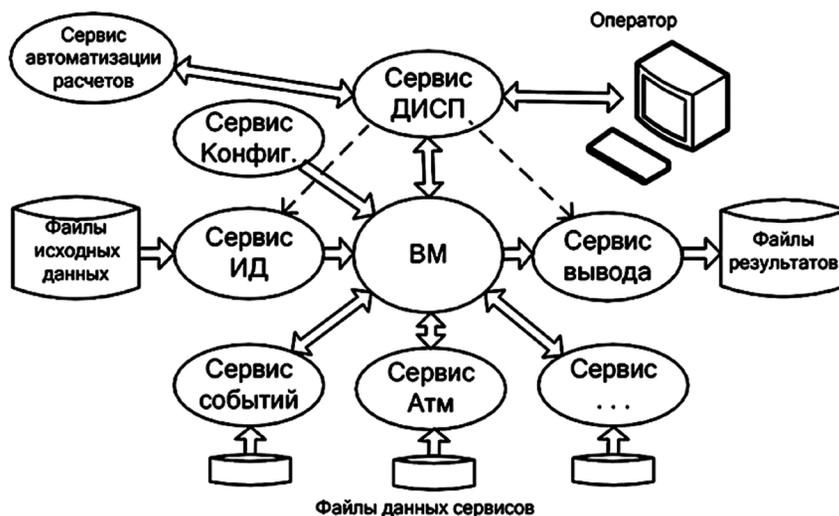


Рис. 2. Архитектура КМ

Понятия КМ и ЦД закреплены нормативно и широко используются на практике, однако термин ЦД имеет довольно широкую трактовку. В ГОСТ Р 57700.37–2021 даются определения математической, компьютерной, цифровой моделей и ЦД как разных сущностей нарастающей сложности. Если такой виртуальный объект описывает реально существующий объект, то его можно назвать цифровым двойником этого объекта, так как обеспечивается реальная двухсторонняя связь ЦД и объекта-прототипа: выходные данные ЦД используются для совершенствования объекта-прототипа и настройки самого ЦД. При этом ЦД, как виртуальный объект, связывается с некоторым физическим объектом, внешние параметры которого можно определить и использовать для проверки адекватности моделей, включенных в ЦД.

Основной проблемой структурирования КМ является рациональный выбор составных частей и определение конечной степени детализации составных частей КМ. На рис. 3 показан вариант структурирования виртуального объекта в виде КМ объекта-прототипа, на основе ЦД и цифровых фракталов (ЦФ) [7].

Параметры P объекта-прототипа определяют свойства и состав структуры S , объединяющей $ЦД1...ЦДn$, $ЦФ1...ЦФ2.2$, которая представляет собой иерархическое дерево программных блоков, реализующих отдельные части ММ объекта. Входные I и выходные O данные виртуального объекта обеспечивают его связь с объектом-прототипом.

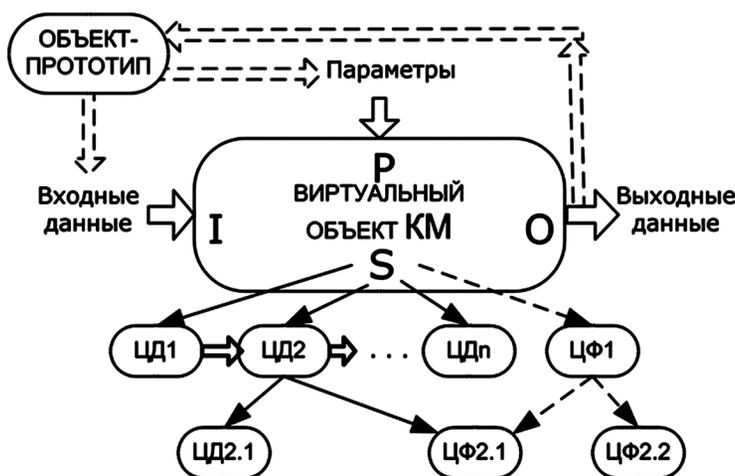


Рис. 3. Структурирование КМ

Понятие ЦФ позволяет определить нижний уровень возможной или целесообразной, на данном этапе, детализации КМ. Порог такой целесообразности определяется как неделимость соответствующей подсистемы с точки зрения полезности получаемой информации и независимости информационных выходов от внешних факторов, включенных в рассмотрение данной КМ. Однако четких критериев выделения составных частей при разработке ЦД нет. Если объект-прототип достаточно сложный, его ЦД можно разбить на части, представляющие собой в функциональном отношении более мелкие ЦД, которые взаимодействуют на информационном уровне, при этом не обязательно дробление на основе физической аналогии. Главное при этом, что ЦД должен иметь практическую ценность как инструмент исследования объекта-прототипа. Начиная с некоторого этапа такое дробление приобретает новые свойства: теряется смысл дальнейшего разбиения с точки зрения рассмотрения функциональных свойств, фактически теряется информационный смысл модели.

Для обозначения такого минимального или близкого к функциональному минимуму объекта используется термин цифровой фрактал [7]. Определяющим признаком ЦФ является его характеристика как информационного объекта — после создания он не может дать новой информации, так как все его возможное описание содержится внутри него и соответствует текущему уровню знаний о прототипе, на основе которого создан ЦФ.

Средства автоматизации массовых расчетов

Несмотря на наличие в большинстве современных вычислительных языков программирования встроенных средств распараллеливания вычислений, на практике они используются не всегда. С одной стороны это объясняется повышенными требованиями к квалификации программиста-разработчика КМ. С другой стороны, разработчик КМ должен хорошо разбираться в предметной области, связанной с разрабатываемой КМ, и выстраивать параллельные потоки в ВМ, понимая работу заложенных алгоритмов. Однако подбор таких программистов — систем-

ных инженеров обходится дорого и в ряде случаев затруднителен.

Практический выход в преодолении этой трудности состоит в разработке технологического подхода, позволяющего автоматизировать создание и контроль множества вариантов исходных данных, осуществлять автоматизированный одновременный запуск множества экземпляров рабочей программы КМ для разных наборов ИД и наблюдать за текущим состоянием запущенных процессов. Все эти возможности реализованы в программе графического пользовательского интерфейса [5] являющейся своеобразным менеджером вычислительного процесса. Проведенные исследования [8, 9] показали возможность полной загрузки многоядерных вычислительных платформ с помощью ГПИ. При одновременном запуске множества однопоточных вычислительных задач время счета отдельной задачи возрастает незначительно. Поскольку при проведении ИМ необходимо просчитывать несколько десятков реализаций для каждого варианта исходных данных, задача распараллеливания вычислений внутри ВМ становится не актуальной.

На рис. 4 показано главное окно управления ГПИ, в котором состояние расчетов каждого экземпляра КМ представляется в окне процессов (слева на рисунке), отображающего текущее состояние каждого процесса и его системный вывод. Закладки в правой части окна управления ГПИ позволяют отобразить исходные данные (показано на рисунке справа), 2D- или 3D-графики результатов моделирования.

Каждый запущенный экземпляр рабочей программы КМ в операционной системе (ОС) представляет собой отдельный процесс, а распределение нагрузки между отдельными ядрами процессора может осуществляться ОС автоматически или задаваться управляющим модулем ГПИ. Кратность увеличения скорости при распараллеливании расчетов ограничивается числом ядер процессора, что автоматически обеспечивается ГПИ.

Сообщения КМ отображаются в отдельном окне ГПИ (в левой части рис. 4). При этом отображение исходных данных и результатов расчетов в виде графиков или таблиц возможно для каждого из запущенных процессов.

Исходные данные читаются из файла исходных данных унифицированного формата, могут

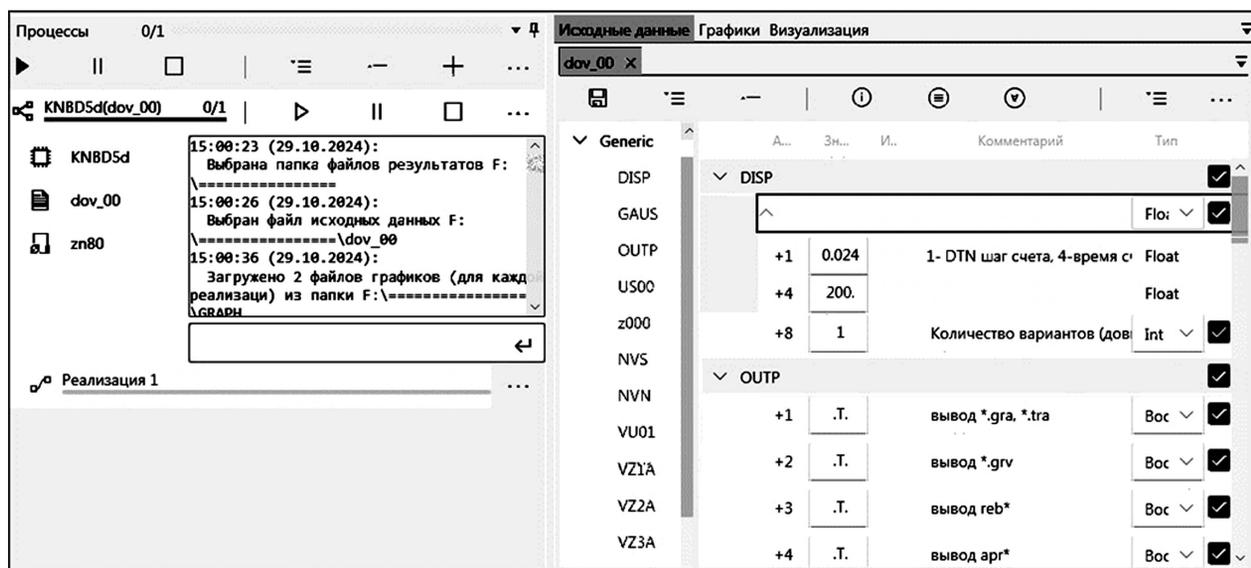


Рис. 4. Окно ГПИ и исходные данные

быть модифицированы и сохранены в разных форматах. Сохраненные файлы используются для ручного или автоматического запуска расчетов.

В окне графиков ГПИ одновременно можно отобразить до 16 панелей, в каждой из которых может отображаться один или несколько графиков. Особенностью связки ГПИ–рабочая модель является то, что графическая информация отображается «на лету», в процессе выполнения расчетов в модели. Окно визуализации позволяет отобразить 3D-траекторию движения объектов.

Поскольку программа ГПИ выполнена в виде отдельного приложения и не встраивается в КМ, единственным требованием для рабочей КМ, запускаемой из ГПИ, являются соглашения по форматам входных и выходных данных, обеспечивающих функционирование ГПИ в полном объеме.

Выводы

На основе проведенного рассмотрения системы ИМ можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемый подход в рамках разработанной технологии по сравнению с традиционным подходом «одна модель — один интерфейс» обеспечивает ряд преимуществ на разных этапах применения математического моделирования:

- при разработке КМ: значительное снижение временных затрат; повышение надежно-

сти КМ; невысокий объем доработки существующих КМ; облегчение проведения верификации и валидации КМ;

- при эксплуатации КМ: снижение в несколько раз временных затрат при проведении ИМ; снижение рисков ошибок оператора при подготовке исходных данных; снижение требований к квалификации оператора КМ.

2. Разделение КМ на вычислительный модуль и сервисы позволяет значительно сократить время разработки КМ и повысить надежность программного кода.

3. Разработка унифицированного формата исходных данных решает проблему универсальности исходных данных для многих КМ и обеспечивает автоматизацию массовых расчетов.

4. Средства автоматической генерации и контроля исходных данных позволяют исключить ошибки, связанные с ручной обработкой множества файлов исходных данных и существенно сокращают время анализа результатов при массовых расчетах в заданной параметрической области.

5. Структурирование компьютерных моделей в виде иерархического построения цифровых двойников обеспечивает удобство и надежность программной разработки при одновременном обеспечении возможности валидации ЦД отдельных объектов или их подсистем.

6. Необходимая и целесообразная степень структурирования цифрового двойника может

быть обоснована с помощью понятия цифрового фрактала.

7. Автоматизированный запуск моделирующей программы с применением ГПИ обеспечивает максимально возможную загрузку данной вычислительной платформы.

Список источников

1. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. М.: Альтекс-А, 2004. 384 с.

2. Стрoгалев В.П., Толкачѳва И.О. Имитационное моделирование: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 с.

3. Эльберг М.С., Цыганков Н.С. Имитационное моделирование: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 128 с.

4. Коротков С.С., Дибижев А.А., Савченко М.В. О тенденциях и требованиях развития современной авиационной техники // Труды ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики. 2022. № 3 (8). С. 32–41.

5. Правидло М.Н., Бирюков П.А., Тищенко Д.Ю., Мацера М.С. Графический пользовательский интерфейс для работы с компьютерными моделями / IV Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем», г. Москва 26–27 ноября 2020 года: Сб. тезисов докладов. М.: ГНЦ РФ ФГУП НИИАС, 2020. С. 66–67.

6. M. Grieves, J. Vickers. Origins of the Digital Twin Concept. Journal of Florida Institute of Technology, 2016. Vol. 8. Pp. 3–20.

7. Правидло М.Н., Бирюков П.А., Тищенко Д.Ю. Цифровой двойник и цифровой фрактал в компьютерной модели / Актуальные вопросы состояния, эксплуатации и развития комплексов бортового РЭО воздушных судов — «АВИОНИКА» // Материалы Всероссийского форума с международным участием «Академические Жуковские чтения», г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 23–24 ноября 2023.

8. Правидло М.Н., Бирюков П.А., Тищенко Д.Ю., Мацера М.С. Распараллеливание задач при статистическом моделировании / Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки — «АВИАТОР» // Материалы VIII-й Международной научно-практической конференции. ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 11–12 февраля 2021.

9. Правидло М.Н., Бирюков П.А., Тищенко Д.Ю., Мацера М.С. Исследование межпроцессного взаимодействия компьютерной модели и графического пользовательского интерфейса / Материалы международной конференции, проводимой МАИ в рамках Года науки и технологий на базе Международного авиационно-космического салона МАКС-2021, г. Жуковский, 21–22 июля 2021. С. 26–27.