

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Джанунца Гарика Апетовича

**«Методы обработки данных в информационно-вычислительных системах  
для моделей периодических процессов»,**

представленную на соискание учёной степени доктора технических наук  
по специальности 2.3.8 – «Информатика и информационные процессы»

**Актуальность темы.** Обработка данных процессов механики, физики, техники, инженерного дела неотделима от обработки данных в математических моделях, которые позволяют в сжатом формализованном виде описывать соответствующие теоретические закономерности и проводить логические преобразования. Современные математические модели используются как средство выявления закономерностей функционирования реальных систем и решения связанных с ними практических задач. Мощный импульс развитию математического моделирования был дан в середине прошлого века с появлением вычислительной техники, которая позволила решать качественно новые задачи, недоступные ранее в силу их чрезвычайно высокой сложности и трудоёмкости необходимых расчётов: например, это касается ядерной физики, космонавтики, метеорологии, управления производством. Современные научные исследования характеризуются широкой автоматизацией на основе средств вычислительной техники, что связано с большими объёмами обрабатываемых данных. Важнейшее значение приобретают новые методы и алгоритмы, обеспечивающие своевременное и эффективное преобразование информации. Для адекватного описания сложных систем строятся ряды последовательно усложняемых моделей, всё более точно описывающих реальность. С одной стороны, усложнение моделей повышает их адекватность (точность описания моделируемого объекта), выявляет новые эффекты. С другой стороны, за повышение адекватности приходится платить в двух смыслах. Во-первых, увеличивается число параметров и тем самым требования к сбору данных, необходимых для моделирования. Во-вторых, возрастает техническая трудность нахождения решения задачи и его исследования (например, на устойчивость). Это влечёт необходимость установления компромисса. Последовательность усложняющихся моделей, учитывающих всё новые закономерности поведения объекта, в пределе описывает его поведение с любой желаемой точностью. Однако при этом так же бесконечно растут сложность исследования модели и требования к её информационному обеспечению. Поэтому каждая конкретная задача прикладного исследования должна ставиться и решаться с учётом реальных целей и имеющихся возможностей.

Работа Г.А. Джанунца посвящена методам обработки данных в информационно-вычислительных системах для моделирования периодических процессов. Исследование моделей периодических процессов актуально для самых различных областей науки и техники и, как правило, выполняется с помощью численных расчётов. В ряде важных процессов это приводит к необходимости разработки новых высокоточных и быстродействующих методов обработки данных, что и составляет основное содержание диссертационной работы. Исследуется численная обработка данных моделей периодических автоколебательных реакций, процессов переноса и моделей прогнозирования движения космических аппаратов (КА) с периодической орбитой. При этом повышение точности и скорости обработки данных особо актуально для глобальных навигационных спутниковых систем, в частности, при определении текущего положения

навигационного космического аппарата (НКА) на основе обработки данных оперативной эфемеридной информации. Динамика изменения положения НКА на околоземной орбите описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), в работе они кратко именуется термином "дифференциальные системы". Представленные в диссертации методы позволяют *на порядки* сократить количество расчётов по сравнению с известными численными методами, применяемыми для построения требуемых высокоточных приближений. Основной подход к разработке и исследованию вычислительных алгоритмов, представленных в диссертации, опирается на кусочную интерполяцию. Её применение развивается в одновременно конструктивные и универсальные методы, которые помимо высокой точности и быстродействия обеспечивают непрерывность приближения численных данных как аналитическое приближение решения задачи Коши для дифференциальной системы, моделирующей процесс. Все конструктивные вычислительные алгоритмы тщательно обоснованы и доведены автором до практической программной реализации.

Диссертация Джанунца Г.А. включает математически обоснованные, принципиально новые методы, необходимые для численного моделирования актуальных процессов реальности. Тема диссертационной работы несомненно актуальна.

**Цель диссертационного исследования** состоит в разработке и исследовании высокоточных быстродействующих алгоритмов и программ обработки данных в ИВС для моделей периодических процессов, в числе которых периодические автоколебательные реакции, модели процессов переноса и прогнозирования движения космических аппаратов с периодической орбитой. Для этого, в частности, целесообразно построение библиотеки стандартных программ ИВС высокоточного вычисления функций и обработки данных интегральных моделей с малой временной сложностью в режиме реального времени.

**Паспорту специальности 2.3.8 – Информатика и информационные процессы** диссертация соответствует в следующих разделах: п. 1 – Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения, п. 3 – Разработка методов и алгоритмов кодирования, сжатия и размещения информации для повышения эффективности и надёжности функционирования инфокоммуникационных систем при её хранении и передаче; п. 6 – Обеспечение информационных систем и процессов, применения информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления. Общие принципы и основы организации информационных служб и электронных библиотек, п. 8 – Разработка систем принятия решения на основе баз данных и знаний, реализующих имитационные модели прогнозирования изменения материальных процессов и событий, п. 16 – Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в следующем:

1. Предложен метод разностно-полиномиальной обработки данных в ИВС с программным выбором варьируемых параметров для моделей периодических процессов, построенный на основе обработки данных на временных подынтервалах интерполяционными полиномами Ньютона, программно преобразуемыми в форму

алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами, что отличает метод от известных по построению. Метод использует разностную обработку узловых значений, применяет итерационное уточнение и обеспечивает повышение точности при уменьшении времени обработки данных, что позволяет улучшать качество моделирования исследуемых процессов.

2. Разработана модификация метода обработки данных в ИВС с автоматизированным выбором варьируемых параметров для моделей периодических процессов, исключая использование разностных схем. Модификация построена на основе кусочной интерполяции на временных подынтервалах правой части дифференциальной системы и интегральном приближении решения в виде алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами, использует итерационные уточнения, аналогичные интегральным приближениям Пикара. Модифицированный метод отличается от известных аналогов по своему построению и повышенной точностью обработки данных на больших отрезках времени, что улучшает качество численного моделирования.

3. Дано обоснование сходимости, выполнены оценки скорости сходимости предложенного метода и его модификации для кусочно-интерполяционной обработки данных с итерационным уточнением в случае произвольного отрезка времени.

4. Выполнена программная реализация предложенного метода с автоматизированным выбором параметров, адаптирующихся к структуре модели и реализующих динамическую коррекцию начальных данных, что отличает метод от известных и позволяет достигать наибольшей точности гладкого аналитического приближения данных на отрезке произвольной длины при минимальном времени обработки. При этом достигается вычислительная устойчивость обработки данных в ИВС для широкого класса моделей периодических процессов, в числе которых модели жёстких задач.

5. Предложен метод варьируемой кусочно-интерполяционной обработки числовых данных модели переноса с итерационным уточнением, построенный на основе интерполяционного полинома Ньютона от двух переменных, программно преобразуемого в алгебраический полином с числовыми коэффициентами, что отличает метод от известных по построению. Применяется двумерное итерационное уточнение обработанных данных, позволяющее получить кусочно-гладкое аналитическое приближение движения волны в прямоугольной области со сравнительно высокой точностью, что повышает качество моделирования процесса переноса.

6. Представлено доказательство сходимости, даны оценки скорости сходимости кусочно-интерполяционной обработки данных с итерационным уточнением для модели переноса в прямоугольной области, что составляет обоснование предложенного метода.

7. Разработана алгоритмизация и программная реализация предложенного метода обработки данных модели переноса с автоматизированным выбором параметров, обеспечивающим наибольшую точность при наименьшем времени обработки и вычислительную устойчивость, что в сочетании с кусочной гладкостью приближения данных позволяет детализировать и повысить качество численного моделирования процесса переноса.

8. Предложен метод создания библиотеки стандартных программ в ИВС на основе кусочно-интерполяционной обработки данных с хранением полиномиальных коэффициентов, позволяющий параллельно воспроизводить приближения стандартных и

специальных функций в моделях периодических процессов с точностью порядка  $10^{-20}$  на произвольном множестве точек фиксированной области за время единичного порядка.

9. Представлена модификация кусочно-интерполяционной обработки данных дифференциальной модели, позволяющая существенно повысить быстродействие без потери точности обработки за счет замены автоматического выбора параметров их пользовательским подбором и фиксированием. Разработанные на этой основе с помощью хранимых коэффициентов быстродействующие алгоритмы высокоточного воспроизведения специальных функций и их производных позволяют в моделях периодических процессов получать высокоточные приближения со свойством гладкости на больших интервалах времени.

10. Разработан комплекс программ кусочно-интерполяционной обработки данных в ИВС для моделей жёстких и нежёстких задач, включающий автоматический и пользовательский выбор параметров для адаптации к классам моделей. Комплекс позволяет выполнять быстродействующее высокоточное моделирование периодических автоколебательных реакций, что необходимо для отладки технологических процессов на их основе, включает обработку данных модели процесса переноса для уточнения форм и динамики перемещения волн.

11. Представлен комплекс программ для моделирования в ИВС движения КА, позволяющий рассчитывать время и параметры вывода КА на устойчивую периодическую орбиту при управлении, соответствующем внешнему воздействию гравитационных сил. Сравнительно малая временная сложность предложенной обработки данных позволяет применять комплекс для управления движением КА в режиме реального времени. Кроме того, комплекс программ позволяет рассчитать с повышенной точностью координаты спутника, выведенного на низкую околоземную орбиту, в произвольный момент времени, что необходимо для измерений с помощью лазерного дальномера от пункта наблюдения до искусственного спутника Земли (ИСЗ).

12. Разработаны алгоритмы и программы для численного моделирования движения НКА ГЛОНАСС по данным эфемерид, позволяющие существенно ускорить процесс расчёта координат и составляющих вектора скорости центра масс НКА ГЛОНАСС с превышением требуемой точности в произвольно заданные моменты времени из 30-минутного интервала прогнозирования. Предложенные алгоритмы и программы позволяют сохранять гладкое аналитическое приближение координат траектории и скорости движения НКА в памяти компьютера и восстанавливать его без повторного вычисления траектории в произвольной точке интервала прогнозирования за время единичного порядка без снижения точности приближений. На данной основе совершенствуются известные методы процессов прогнозирования и архивации, создаются отличительные предпосылки прогноза непрерывного отрезка траектории движения НКА и расширения интервала прогнозирования.

13. На основе кусочной интерполяции получены формулы обработки интегральных данных, представляющие собой разновидность формул Ньютона-Котеса. Вычисление интегралов с хранимыми в памяти компьютера коэффициентами реализовано программно. Программный интерфейс стандартизирован до задания подынтегральной функции, промежутка интегрирования, как вариант может включать степень полинома и число подынтервалов. Интегральная обработка реализуется с высокой точностью на временных интервалах большой длины. На промежутках стандартной для обработки данных длины достигается нулевая граница погрешности. Одновременно с минимизацией погрешности

минимизируется время вычисления интегралов, что в целом существенно отличает предложенный метод от известных.

**Научная и практическая значимость.** Научную и практическую значимость в области обработки данных в ИВС моделей периодических процессов имеют разработанные в диссертации высокоточные быстродействующие методы и программная реализация обработки числовых данных дифференциальных моделей, включая модели периодических автоколебательных реакций, модели процессов переноса и модели прогнозирования движения КА. Научную значимость в области численных методов имеют представленные в диссертации кусочно-интерполяционные методы приближённого решения дифференциальных систем, отличающиеся от известных способом построения, инвариантностью вычислительного алгоритма относительно задач различных классов, высокой точностью и гладкостью полученного приближения с одновременной минимизацией временной сложности. Аналогично, значимы представленные в работе методы, алгоритмы и программы варьированного кусочно-интерполяционного вычисления функций, отличающиеся малой погрешностью, гладкостью непрерывного приближения с минимизацией временной сложности, а также аналог подхода Ньютона-Котеса вычисления интегралов в случае произвольной степени интерполяционного полинома, реализованный на основе кусочно-интерполяционного приближения подынтегральных функций. Научно значимым является метод кусочно-интерполяционного решения уравнения переноса на основе интерполяционного полинома Ньютона от функции двух переменных варьированной степени с итерационным уточнением. Метод позволяет достигать высокой точности и кусочной непрерывности приближения решения линейного и квазилинейного уравнения переноса и уточнить на этой основе параметры волнового процесса. Предложенные методы основаны на инвариантном программном переводе интерполяционных полиномов в форму алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами с помощью алгоритма отличного от формул Виета и уравнений Ньютона для симметрических функций.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в прикладном характере предложенных методов обработки данных, включающих кусочно-интерполяционные решения ОДУ и уравнения в частных производных, которые применяются для компьютерной реализации моделей колебательных динамических процессов, включая химические и биохимические реакции (реакция Белоусова-Жаботинского, релаксационные автоколебания в системе гликолиза, колебательная реакция окисления молекулярного водорода), электрическое равновесие автогенератора с внутренней обратной связью, движение КА с управлением при помощи «малой тяги», возмущённое движение КА, прогнозирование положения НКА системы ГЛОНАСС, а также моделирование переноса волны. Результаты численного моделирования необходимы для отладки технологических процессов на основе периодических реакций, для эффективного управления движением КА в режиме реального времени, для прогнозирования движения и расчёта координат ИСЗ в произвольно заданные моменты времени, повышения точности и скорости расчёта пространственных данных об объектах. На этой основе разработан программный комплекс, реализующий методы как с автоматическим, так и с пользовательским подбором параметров. Комплекс предназначен для решения актуальных задач обработки данных моделей, связанных с исследованием динамических систем и автоколебательных процессов. В аспекте практического применения существенно сочетание универсальности кусочно-интерполяционных методов, их высокой точности, быстродействия и гладкости приближения, позволяющее

повышать качество численного моделирования в режиме реального времени. Сочетание данных характеристик сохраняется при численном моделировании процессов, описываемых жёсткими и нежёсткими системами ОДУ. Практическую значимость имеет точность и гладкость предложенного метода обработки данных, позволяющие получить координаты и составляющие вектора скорости центра масс НКА ГЛОНАСС с превышением требуемой точности в произвольно заданные моменты времени из 30-минутного интервала прогнозирования, при этом время расчёта примерно вдвое меньше времени известных методов. Имеет значение возможность сохранять в памяти компьютера приближение компонента траектории в виде типизированного файла. Хранимым оказывается непрерывное и гладкое приближение каждого компонента траектории, при этом траектория восстанавливается без повторного вычисления в произвольной точке интервала прогнозирования. Процесс прогнозирования естественным образом архивируется, создаются предпосылки прогнозирования непрерывного отрезка траектории движения НКА и увеличения существующего интервала прогнозирования.

**Внедрение и использование результатов диссертации.** Полученные в работе результаты использованы:

1. В АО НКБ ВС для моделирования движения и автоматического управления подвижными объектами; для повышения точности численного моделирования автоколебательных процессов при автоматизированном управлении движением объектов; при расширении библиотеки стандартных программ вычисления элементарных, повторяющихся и специальных функций для бортовых вычислителей систем автоматического управления движением подвижными объектами и с целью вычисления композиций сложных функций с минимальной временной сложностью при высокой точности приближения функций. Разработанный программный комплекс используется для численного моделирования процессов управления с широко варьируемыми параметрами с целью уточнения физико-технологических и динамических характеристик моделируемых процессов.

2. В АО «ВНИИЖТ» для повышения точности прогнозирования положения объекта, а также для моделирования навигационного управления; для расширения библиотеки стандартных программ вычисления элементарных, часто повторяющихся и специальных функций с целью ускорения процесса численного моделирования, а также уточнения значения параметров в моделях дистанционного зондирования с помощью спутников и БПЛА. Разработанный программный комплекс принят к использованию с целью уточнения физико-технологических характеристик моделируемых процессов в режиме реального времени; программный комплекс для численного моделирования движения навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС принят к использованию с целью ускорения и повышения точности расчёта координат местоположения и скорости движения исследуемых объектов.

3. В учебном процессе кафедры информатики Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиала) ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)» в курсах «Компьютерное моделирование», «Математическое и имитационное моделирование», «Алгоритмы численного интегрирования и анализа устойчивости», «Численные методы в анализе данных», «Визуализация данных», «Специальные разделы информатики», «Современные инструментальные средства», «Программирование», «Современные методы построения программ», «Численные методы», «Математическое моделирование и численные эксперименты», «Современные технологии программирования», «Абстрактная и компьютерная алгебра» и «Параллельные алгоритмы».

В приложении к диссертации даны справки, подтверждающие использование и внедрение.

Основные результаты диссертационной работы Г.А. Джанунца достаточно полно **апробированы** на всероссийских и международных научно-технических конференциях и симпозиумах, отражены в 52 научных работах общим объёмом около 82 печатных листов, из которых 17 из списка изданий, рекомендованных ВАК; 5 научных работ опубликовано в российских и зарубежных изданиях, индексируемых в системах Web of Science, Scopus. Полученные в диссертации результаты были положены в основу исследований по проектам, поддержанным Российским фондом фундаментальных исследований: 10-07-00178-а «Численная оптимизация на основе сортировки с приложением к анализу устойчивости, поиску и распознаванию»; 12-07-00143-а «Компьютерные методы численной оптимизации на основе сортировки с приложением к анализу устойчивости, разностно-полиномиальному решению дифференциальных уравнений, распознаванию изображений и цифровой обработке сигналов»; 16-07-00100-А «Компьютерные методы варьируемого кусочно-полиномиального решения дифференциальных уравнений и анализа устойчивости».

**Достоверность** полученных результатов вытекает из корректного математического обоснования с помощью аналитических оценок сходимости и погрешности приближений, данных в леммах и теоремах, а также из оценок временной сложности формализованных алгоритмов, подтверждается результатами численного и компьютерного моделирования, программного и численного эксперимента.

**Положительными моментами** работы являются:

- стилистическая, научная и математическая грамотность изложения;
- оригинальность, эффективность и практическая ценность предложенных методов;
- международный уровень научных результатов, что свидетельствует о творческом потенциале автора;
- представляют интерес аналитический характер численного интегрирования задачи Коши, метод хранения аналитического приближения в памяти компьютера.

**Замечания по диссертационной работе.** По ряду положений работы имеются следующие замечания.

1. Леммы, теоремы, следствия с развёрнутыми доказательствами иногда длинны, например, доказательство теоремы 3.2 на стр. 141 – 146, теоремы 4.2 на стр. 203 – 206. Их можно было бы сократить со ссылками на опубликованные работы.

2. Иногда фрагменты доказательств не несут нового содержания по отношению к изложенным рассуждениям. Так, вторая часть доказательства теоремы 3.2 (стр. 141 – 146) фактически повторяет первую часть доказательства с формальной сменой обозначений одномерного случая на многомерный. Вместо этого можно было бы просто указать переход на многомерный случай по аналогии с одномерным.

3. Некоторые доказательства не вполне корректны. Так, доказательство теоремы 3.2 без обоснования использует предположения (3.21) и (3.25), что делает предположения спорными.

4. Предложенные методы не вполне корректно связывают количество подынтервалов и подобластей кусочной интерполяции с результатом итерационного уточнения. По сути это количество должно меняться в зависимости от результата уточнения, алгоритмически входить в итерационный процесс, чего нет в описаниях методов. Эта зависимость эвристически используется в программных реализациях, но не раскрыта в математическом описании методов.

5. Предложенные методы следовало преподнести более системно как единый принцип в начале диссертационной работы. Тогда удалось бы избежать повторения с точностью до обозначений формул и алгоритмов в главах, как, например, в главе 2, формулы (2.1) – (2.11), стр. 81 – 85, и в главе 5, формулы (5.16) – (5.32), стр. 273 – 277.

Указанные замечания относятся к отдельным моментам работы и не снижают высокой оценки и научной значимости диссертации в целом.

**Заключение.** Работа интересна по содержанию, обладает теоретической и практической значимостью, в целом корректно изложена в доказательной форме. Диссертация представляет собой завершённое научное исследование в новых научных направлениях, включает решение важных научно-технических задач, содержание работы соответствует отрасли науки и специальности 2.3.8 – «Информатика и информационные процессы».

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п. 2. Положения о присуждении учёных степеней в ЮФУ, а ее автор, Джанунц Гарик Апетович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.8 – «Информатика и информационные процессы».

#### **Официальный оппонент**

заведующий кафедрой прикладной математики  
и программирования Института математики,  
механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича  
Южного федерального университета,  
доктор физико-математических наук, профессор

«08» 08 2023 г. Г. Угольницкий Угольницкий Геннадий Анатольевич  
Согласен на обработку моих персональных данных

#### **Контактная информация организации**

Полное наименование: Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южный федеральный университет»

Адрес: 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Сайт: <https://sfedu.ru/>

Телефон: +7(863)263-31-58

E-mail: [info@sfedu.ru](mailto:info@sfedu.ru)



личную копию

подтверяю

личным секретарь Совета

Южного федерального университета

Мирошниченко О.С.