

ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА
о диссертационной работе Джанунца Гарика Апетовича
**«Методы обработки данных в информационно-вычислительных системах
для моделей периодических процессов»,**

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.3.8 – «Информатика и информационные процессы (технические науки)»

Джанунц Гарик Апетович окончил Таганрогский государственный педагогический институт в 2009 году по специальности «Математика» с дополнительной специальностью «Информатика» и получил диплом с отличием. В 2012 году по завершению очной аспирантуры защитил кандидатскую диссертацию «Компьютерный метод кусочно-полиномиального приближения решений обыкновенных дифференциальных уравнений в применении к моделированию автоколебательных реакций» по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Во время обучения в аспирантуре получал стипендию Правительства Российской Федерации, стипендию Мэра города Таганрога. С 2010 года работал в ДГТУ и ТГПИ имени А.П. Чехова в разных должностях. В 2012 году стал победителем конкурса «Лучший молодой ученый ТГПИ имени А.П. Чехова». С 2014 г. по настоящее время работает доцентом кафедры информатики Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)».

Актуальность темы диссертационного исследования. Разработка, исследование и создание высокоточных быстродействующих методов обработки данных в информационных вычислительных системах (ИВС) актуальны для моделей процессов в важных научно-технических и технологических областях исследований. В частности, это относится к моделям периодических процессов, включая модели периодических автоколебательных реакций, модели процессов переноса и модели прогнозирования движения космических аппаратов с периодической околоземной орбитой. Известны трудности обработки данных периодических реакций, модели которых приводят к жестким дифференциальным системам. Эти трудности обусловлены тем, что правые части дифференциальных систем принимают быстро меняющиеся значения в окрестностях точек смены направления реакции. В таких точках остаточные члены численных методов быстро растут по модулю, что отражает факт быстрого роста погрешности, подтверждаемый численными экспериментами во всех применяемых методах. Проблема столь существенна, что создаются специализированные методы практически для каждого класса жестких систем. По сути то же можно сказать о моделях волновых процессов. В нежестких моделях, например, движения целевого объекта, важна скорость обработки данных для сопровождения объекта в реальном времени. В моделях прогнозирования движения космических аппаратов (КА) с периодической околоземной орбитой важна обработка данных одновременно с высокой скоростью и точностью. Так, глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС), предназначенная для определения местоположения, скорости движения, точного времени морских, воздушных, сухопутных и космических потребителей, использует дифференциальные модели прогнозирования в навигационном приемнике текущего положения навигационного КА (НКА). Прогноз выполняется на основе обработки данных оперативной эфемеридной информации из навигационного сообщения с применением модели периодического возмущенного движения НКА на околоземной орбите. Модель движения представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Точность и скорость прогноза параметров движения НКА существенно зависит от метода обработки данных дифференциальной модели, в частности, от численного метода решения ОДУ. Аналогичные

качества обработки данных требуются для моделей динамических процессов в механике, планетной астрономии, астрофизике, теории автоматического управления, включая управление движением и стабилизацией КА, движением роботов и коррекцией движения объектов к заданной цели. Объективно возникающие требования, как правило, противоречивы. Повышение точности численных методов достигается уменьшением шага метода и дополнительными математическими операциями, обеспечивающими снижение погрешности. Как следствие, время решения задачи возрастает с превышением допустимых ограничений. В результате, несмотря на неуклонный рост мощности современной вычислительной техники по параметрам быстродействия и памяти, одним из наиболее важных требований к методам численного моделирования является минимизация количества операций при одновременном росте точности обработки данных. Таким образом, проблема обработки данных в ИВС для дифференциальных моделей периодических процессов с высокой точностью и одновременно с минимизацией временной сложности является актуальной. В диссертации основной подход к разработке и исследованию вычислительных алгоритмов, удовлетворяющих названным требованиям, опирается на кусочную интерполяцию. Снижение роста погрешности достигается за счет программно регулируемой малости длины текущего подынтервала (подобласти), на котором вычисляется функция, интерполируется правая часть дифференциальной системы и приближается решение, а не за счет роста степени (соответственно числа операций) интерполяционного полинома. Количество вычислительных операций на подынтервале (в подобласти) оказывается минимизированным, эти операции не влекут вычислительной сложности, не происходит накопления дополнительной погрешности на подынтервале. Разработка и исследование высокоточных быстродействующих методов обработки данных в ИВС для моделей периодических процессов на основе интерполяционных полиномов оригинально дополняется итерационным уточнением. При этом алгоритмически достигается и программно реализуется гладкость аналитического приближения данных на отрезке (подобласти) произвольных размеров. Для достижения целей диссертационного исследования выполнено построение библиотеки стандартных программ ИВС высокоточного вычисления функций и обработки данных интегральных моделей в режиме реального времени. В результате исследования получены алгоритмы и программы для моделирования движения НКА ГЛОНАСС по данным эфемерид, позволяющие существенно ускорить процесс расчета 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 в памяти компьютера гладкое аналитическое приближение координат траектории и скорости движения НКА и восстанавливать хранимое приближение без повторного вычисления траектории в произвольной точке интервала прогнозирования за время единичного порядка без снижения точности приближений. На данной основе улучшается качество прогнозирования, совершенствуется его архивация, создаются предпосылки прогнозирования непрерывного отрезка траектории движения НКА и расширения интервала прогнозирования. В диссертации получены принципиально новые научные результаты, имеющие значимые научно-технические приложения в важных областях современных исследований. Результаты математически обоснованы, подтверждены численными экспериментами, научно достоверны.

На основании изложенного тема диссертации Джанунца Г.А. актуальна.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Предложен метод разностно-полиномиальной обработки данных в ИВС с программным выбором варьируемых параметров для моделей периодических процессов. Метод отличается от анало-

гов обработкой данных на подынтервалах интерполяционными полиномами Ньютона, программно преобразуемыми в форму алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами. Отличия дополняются разностной обработкой узловых значений, применением итерационного уточнения, автоматизированным выбором параметров, что позволяет повысить точность и уменьшить время обработки данных по сравнению с известными методами, а также улучшить качество моделирования исследуемых процессов.

2. Представлено развернутое исследование, показана сходимость, дана оценка скорости сходимости предложенного метода. Для корректного применения метода достаточно двукратной дифференцируемости правой части дифференциальной системы, что положительно отличается от условий применения аналогов и повышает качество моделирования в ИВС периодических процессов с быстро меняющейся динамикой.

3. Как развитие метода обработки данных в ИВС с автоматизированным выбором варьируемых параметров и итерационным уточнением для моделей периодических процессов предложена модификация, не использующая разностные схемы. Модификация отличается от аналогов кусочной интерполяцией на подынтервалах правой части дифференциальной системы и интегральным приближением решения в виде алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами, а также выполнением итераций на подынтервалах, аналогичных интегральным приближениям Пикара. Относительно известных методов достигается повышение точности обработки данных на больших отрезках времени, улучшается качество численного моделирования.

4. Представлено развернутое исследование, показана сходимость предложенной модификации кусочно-интерполяционного метода обработки данных и сходимость итерационного уточнения, даны оценки скорости сходимости. Качества равномерной сходимости и аналитический вид приближения числовых данных отличают предложенную модификацию от известных аналогов.

5. Предложенный метод реализован в виде стандартной программы ИВС, на вход которой поступает правая часть дифференциальной системы, моделирующей процесс, начальные данные и параметры, включающие границы временного отрезка обработки данных модели. Автоматический выбор параметров обеспечивает наибольшую точность при наименьшем времени обработки. Это отличительное качество программной реализации позволяет превышать точность аналогов на два десятичных порядка, при этом варьируемые параметры программно адаптируются к структуре модели и реализуют динамическую коррекцию начальных данных. Достигается вычислительная устойчивость, высокая точность, гладкость аналитического приближения данных на отрезке произвольной длины, что составляет отличие метода для широкого класса моделей периодических процессов в ИВС, в числе которых модели жестких задач и задач с неустойчивыми по Ляпунову решениями.

6. Предложен аналог метода обработки данных в ИВС для моделей с частными производными. В частности, разработана варьируемая кусочно-интерполяционная обработка числовых данных модели переноса, которая отличается от известных применением интерполяционного полинома Ньютона от двух переменных, программно преобразуемого в алгебраический полином с числовыми коэффициентами. Варьируемая интерполяция данных выполняется в каждой прямоугольной подобласти, на которые в зависимости от значений параметров автоматически делится исходная прямоугольная область. Применяется итерационное уточнение обработанных данных. На этой основе получается гладкое приближение данных в прямоугольной подобласти, которое отличает предложенный метод от известных, кроме того, метод отличается значительно более высокой точностью. Согласно численному эксперименту достигается превышение точности известных методов моделирования пере-

носа на несколько десятичных порядков, что позволяет улучшить качество моделирования волновых процессов в ИВС.

7. Представлено развернутое исследование, показана сходимость кусочно-интерполяционной обработки данных модели переноса, даны оценки скорости сходимости. Для случая прямоугольной области оценивается скорость сходимости итерационного уточнения. Для квазилинейной модели переноса предложена схема вывода аналогичных оценок.

8. Выполнена алгоритмизация и программная реализация обработки данных модели переноса, реализован автоматический выбор параметров, обеспечивающий наибольшую точность при наименьшем времени обработки. Программная реализация отличается устойчивостью и точностью обработки, что в сочетании с кусочной гладкостью приближения данных позволяет детализировать и повысить качество моделирования процесса переноса.

9. Предложен метод создания библиотеки стандартных программ в ИВС на основе кусочно-интерполяционной обработки данных. Разновидность кусочной интерполяции позволяет приближать функции с точностью до 10^{-20} на произвольном временном отрезке, при этом стандартные и специальные функции приближаются за время единичного порядка, что положительно отличает метод от известных. Реализованы варианты хранения коэффициентов в разделе констант программы, в типизированном файле, в постоянном запоминающем устройстве, дан алгоритм считывания. Вычисления функции взаимно независимы по значениям аргумента, что влечет параллелизм метода. На основе хранимых коэффициентов любая функция библиотеки может параллельно воспроизводиться на произвольном множестве точек фиксированной области. На аналогичной основе разработано приближение производных в ИВС с точностью до 10^{-16} .

10. Показана возможность существенного снижения трудоемкости без потери точности в предложенном методе обработки данных дифференциальной модели при замене автоматического выбора параметров их пользовательским подбором и фиксированием. Согласно численному и программному эксперименту предложенная модификация превосходит известные методы по быстродействию, при этом достигает более высокой точности обработки данных. В частности, разработаны быстродействующие алгоритмы воспроизведения с помощью хранимых коэффициентов специальных и стандартных функций с гладкостью приближения. Так, функция Бесселя и гипергеометрическая функция, применяемые в моделях периодических процессов, реализуются гладким приближением на больших временных промежутках с быстродействием и точностью, превосходящими характеристики известных аналогов.

11. Разработан комплекс программ обработки данных в ИВС на основе предложенного метода для моделей жестких и нежестких задач, включающий автоматический и пользовательский выбор параметров для адаптации к классам моделей. С помощью комплекса выполнено моделирование периодических автоколебательных реакций (реакции Белоусова-Жаботинского, релаксационных автоколебаний в системе гликолиза, гетерогенной колебательной реакции окисления молекулярного водорода). Результаты отличаются сравнительно высокой точностью и гладкостью обработки данных моделей в допустимых границах трудоемкости, что позволяет уточнить физико-химические параметры автоколебаний и повысить качество моделирования. Комплекс включает программы моделирования процессов переноса, согласно эксперименту точность обработки данных с помощью этих программ по сравнению с аналогами повышается в среднем на восемь десятичных порядков, отличается на порядок меньшим временем обработки и гладкостью приближения, что позволяет уточнить форму и динамику перемещения волн.

12. С применением разработанного комплекса программ выполнено моделирование в ИВС движения КА, рассчитано уточненное время необходимое для вывода КА на устойчивую периодическую орбиту при управлении, соответствующем внешнему воздействию гравитационных сил. Получены уточненные параметры орбиты устойчивого движения КА. Достаточно малая временная сложность предложенной обработки данных позволяет применять метод для управления движением КА в режиме реального времени. Выполнено моделирование возмущенного движения искусственного спутника Земли (ИСЗ), выведенного на низкую околоземную орбиту. Сравнительно высокая точность предложенного метода обработки данных в сочетании с гладкостью и малой временной сложностью дают координаты ИСЗ с требуемой точностью в произвольный момент времени, что необходимо для измерений с помощью лазерного дальномера от пункта наблюдения до ИСЗ и позволяет предупреждать аварийный сход с орбиты.

13. С помощью предложенного программного комплекса выполнена обработка данных эфемерид на модели движения НКА ГЛОНАСС. Точность и гладкость предложенного метода обработки данных позволяют получить координаты и составляющие вектора скорости центра масс НКА с превышением границ требуемой точности в произвольно заданные моменты времени из 30-минутного интервала прогнозирования, при этом время расчета примерно вдвое меньше времени известных методов. Процесс расчета реализован в виде процедуры с параметрами, определяемыми из навигационного сообщения, и может быть полностью автоматизирован с сохранением быстродействия, точности и гладкости обработки данных. Предложен способ дополнительного ускорения обработки данных на модели движения НКА ГЛОНАСС за счет хранения коэффициентов кусочной интерполяции траектории и динамики движения для постобработки данных.

14. Кусочно-интерполяционное приближение координат непрерывно, сходится к траектории НКА ГЛОНАСС и приближает скорость НКА на всем интервале прогнозирования. На каждом подынтервале интервала прогнозирования интерполирующий компонент траектории полином имеет вид алгебраического полинома фиксированной степени с числовыми коэффициентами. Это позволяет сохранять в памяти компьютера приближение компонента траектории в виде типизированного файла коэффициентов полиномов соответствующих подынтервалам разбиения. Непрерывное и гладкое приближение каждого компонента траектории оказывается хранимым и восстанавливается без повторного вычисления траектории в произвольной точке интервала прогнозирования простым алгоритмом считывания как соответствующее значение полинома, что качественно отличается от известных методов. На данной основе процесс прогнозирования естественным образом архивируется. Создаются предпосылки прогнозирования не отдельных точек траектории, а всего непрерывного отрезка траектории движения НКА с расширением интервала прогнозирования. Приводится программа обработки данных и результаты численного эксперимента, подтверждающие улучшение качества прогнозирования параметров движения НКА.

15. Обработка данных использует многообразие методов, в числе которых приближенное вычисление интеграла. Разработанный кусочно-интерполяционный метод используется для приближения подынтегральной функции. Интерполяция выполняется с помощью полиномов Лагранжа и Ньютона, преобразуемых в форму алгебраических полиномов с числовыми коэффициентами. Полученный полином интегрируется, приводя к инвариантным относительно степени полинома формулам Ньютона-Котеса. Коэффициенты формул не зависят от подынтегральной функции, промежутка интегрирования, хранятся в разделе констант программы. Пользовательский интерфейс программ стандартизируется до задания подынтегральной функции, промежутка интегрирования, как вариант мо-

жет включать степень полинома и число подынтервалов. Показана сходимость метода, даны оценки скорости сходимости, представлены таблицы коэффициентов для стандартизации программ. Приведены коды программ и результаты эксперимента, согласно которым на промежутке длины 500 достигается граница погрешности приближения интеграла порядка 10^{-20} . На промежутках стандартной для обработки данных длины достигается нулевая граница погрешности. Метод распространяется на приближение первообразной функции, в этом случае погрешность имеет порядок 10^{-19} . Одновременно с минимизацией погрешности минимизируется время вычисления интегралов и первообразных, что отличает метод от известных.

Научная и практическая значимость. Научную и практическую значимость в области обработки данных в ИВС моделей периодических процессов имеют полученные в диссертации высокоточные быстродействующие методы и программная реализация обработки данных дифференциальных моделей, включая модели периодических автоколебательных реакций, модели процессов переноса и модели прогнозирования движения НКА. Результаты имеют значение для обработки данных в моделях небесной механики и дифференциальных моделях управления. Самостоятельное значение имеют предложенные в диссертации методы вычислительной математики, прикладной информатики и прикладного программного обеспечения. В аспекте практического применения существенно сочетание в инвариантных кусочно-интерполяционных методах высокой точности, быстродействия и гладкости приближения, позволяющее применять методы для повышения качества численного моделирования, в том числе в режиме реального времени. Практическую значимость имеет в частности то, что точность и гладкость предложенного метода обработки данных позволяют 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 расчета примерно вдвое меньше времени известных методов. Кроме того, 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 всего непрерывного отрезка траектории движения НКА с увеличением существующего интервала прогнозирования.

Результаты диссертации приняты к использованию в АО НКБ ВС, в АО «ВНИИЖТ», в учебном процессе ТИ имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)». Результаты исследования легли в основу ряда грантов РФФИ, в которых автор диссертации был ведущим исполнителем.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 3, 6, 8, 16 паспорта специальности 2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

Публикации и апробация. Результаты исследования сравнительно полно представлены в периодических научных изданиях. По материалам диссертации опубликовано 52 научные работы общим объемом около 82 печатных листов, включая одну монографию и 17 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки России. Требованиям диссертационного совета ЮФУ соответствует 15 опубликованных статей, из которых 5 научных работ опубликовано в российских и зарубежных изданиях, индексируемых в системах Web of Science, Scopus. Основные результаты работы были представлены лично автором на ряде конференций международного академического уровня.

Работу отличает оригинальность подхода, корректность обоснования, полнота численного и программного эксперимента. Диссертация содержит научно и практически значимые результаты, грамотно выстроена методически. В процессе работы над диссертацией Г.А. Джанунц проявил несомненные творческие способности в предметной области исследования. Автор отличается самостоятельностью и трудоспособностью, системностью в проведении исследований. Необходимо отметить высокий научный потенциал автора и редкую личную этичность. Автор является высоко профессиональным исследователем, потенциал которого в полной мере реализован в представленной диссертации.

Диссертационная работа Джанунца Г.А. выполнена на актуальную тему, является завершенным исследованием, в котором содержатся решения важных научно-технических задач, имеет существенную научную перспективу.

В целом, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, обладает научной новизной, имеет практическую ценность, соответствует паспорту научной специальности 2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки), отвечает всем квалификационным требованиям, установленным положением «О присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»», а ее автор, Джанунц Гарик Апетович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по заявленной специальности.

Научный консультант,
профессор кафедры информатики
Таганрогского института имени А.П. Чехова
(филиал) «Ростовского государственного
экономического университета (РИНХ)»,
доктор технических наук, профессор

«10» июня 2023 г.



Ромм Яков Евсеевич

Согласен на обработку моих персональных данных

Контактная информация организации

Полное наименование: Таганрогский институт имени А.П. Чехова
(филиал) «Ростовского государственного
экономического университета (РИНХ)»

Адрес: 347936, Россия, РО, г. Таганрог, ул. Инициативная, д. 48

Сайт: <https://www.tgpi.ru>

Телефон: +7(8634)60-18-12

E-mail: romm@list.ru

