

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной и  
исследовательской деятельности  
Южного федерального университета

д.х.н., доцент

А.В. Метелица

«17» ноября 2023 г.

### **Отзыв ведущей организации**

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» о диссертационной работе Карасевой Татьяны Сергеевны на тему «Эволюционные алгоритмы решения задач символьной регрессии для идентификации динамических систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

#### **1. Актуальность темы исследования**

Одной из важных проблем науки и техники является решение задач предсказания поведения изучаемого объекта во времени на основе численных данных, описывающих его поведение. В таких задачах речь идет об идентификации динамических систем по экспериментальным данным. Под идентификацией динамических систем подразумевается поиск модели по результатам наблюдений над входными и выходными переменными системы. Для решения данной задачи разработано большое число методов, но с ростом сложности технологических и социальных процессов возникает потребность в разработке новых, более эффективных, подходов. Обычно в результате работы большинства методов генерируется модель, непригодная для дальнейшей интерпретации человеком. Однако представление моделей

именно в символьной форме является наиболее удобным для последующего изучения поведения моделируемых систем. В задаче идентификации динамических объектов наиболее корректным является представление в виде дифференциальных уравнений или их систем. При этом, задача построения дифференциального уравнения может быть сведена к задаче символьной регрессии, что и было сделано в работе Карасевой Т.С. Одним из наиболее эффективных инструментов автоматизированного решения задачи символьной регрессии является алгоритм генетического программирования. Большинство существующих методов, которые позволяют найти модель в виде дифференциальных уравнений, предполагают наличие априорных сведений о структуре уравнения, например, линейный вид. Однако далеко не всегда определены четкие априорные требования к структуре, не всегда задача может быть сведена к подбору только параметров уравнения. Таким образом, разработка и исследование методов структурно-параметрической идентификации динамических систем, чему и посвящена диссертационная работа Карасевой Т.С., является актуальной научно-технической задачей.

## **2. Достоверность и научная новизна результатов работы**

Выдвигаемые научные положения, достоверность результатов и обоснованность выводов основаны на корректном применении математического аппарата, положений и методов из области эволюционных вычислений, математического моделирования и теории идентификации динамических систем.

Научная новизна определяется разработанными подходами к структурно-параметрической идентификации динамических систем, основу которых составляют авторские решения: модифицированный алгоритм генетического программирования для поиска структуры дифференциального уравнения, гибридизация с методом дифференциальной эволюции для подбора числовых параметров уравнения, реализация параллельных алгоритмов для поиска моделей в виде систем дифференциальных уравнений, поиск решения

задачи Коши для дифференциальных уравнений и применение процедуры самонастройки эволюционных алгоритмов для предложенных подходов.

Работоспособность и эффективность разработанных в ходе диссертационного исследования подходов подтверждена результатами решения наборов тестовых и практических задач. Результаты диссертационной работы прошли апробацию и получили положительные отзывы на Всероссийских и Международных конференциях, а также опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

### **3. Наиболее существенные результаты исследований и ценность для практического использования полученных соискателем результатов**

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1. Предложен и реализован модифицированный алгоритм генетического программирования, отличающийся терминальным множеством и модифицированными эволюционными этапами и позволяющий получать решение задачи структурно-параметрической идентификации динамических систем в виде дифференциального уравнения по экспериментальным данным.

2. На основе модифицированного алгоритма генетического программирования и дифференциальной эволюции разработан подход к решению задачи структурно-параметрической идентификации динамических объектов в виде дифференциального уравнения, позволяющий автоматизировано определять его порядок, структуру и коэффициенты.

3. На основе модифицированного алгоритма генетического программирования и дифференциальной эволюции предложен и реализован подход для поиска моделей в виде системы дифференциальных уравнений, позволяющий автоматизировано определять количество дифференциальных уравнений в системе, их порядок, структуру и коэффициенты.

4. Разработан самонастраивающийся алгоритм генетического программирования для автоматизации решения в символьном виде задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в разработке программных систем, которые позволяют идентифицировать динамический объект в виде дифференциального уравнения как линейного, так и нелинейного вида по экспериментальным данным, решать задачу Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений в символьном виде и идентифицировать динамические объекты в виде системы дифференциальных уравнений. Данные результаты представляют собой интеллектуальную технологию обработки информации и позволяют строить на практике интерпретируемые модели сложных динамических систем, не предъявляя повышенных требований к квалификации и опыту разработчиков в эволюционных вычислениях и математическом моделировании.

#### **4. Соответствие требованиям по выполнению, оформлению и апробации диссертационной работы**

Диссертационная работа изложена на 128 страницах, содержит введение, три главы, заключение, 13 таблиц, 100 рисунков, список литературы из 119 наименований, 4 приложения.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассматривается постановка задачи идентификации динамических систем, определены основные подходы к идентификации, представлено сведение задачи идентификации к задаче символьной регрессии. Представлено описание алгоритма генетического программирования и метода дифференциальной эволюции.

**Вторая глава** посвящена описанию предложенных подходов на основе алгоритма генетического программирования к структурно-параметрической идентификации динамических систем в виде дифференциальных уравнений и их систем по экспериментальным данным и подход к решению задачи Коши.

**В третьей главе** приведены результаты тестирования предложенных подходов и их апробации на практических задачах. Исследуется зависимость качества получаемых моделей от наличия шума в данных и объема данных. Рассматривается применение подходов при различных входных воздействиях. Приводится сравнение точности моделей, полученных предложенным подходом, непараметрической ядерной оценкой регрессии и рекуррентной нейронной сетью.

**В заключении** изложены основные результаты работы и сделаны итоговые выводы.

**В приложении** приведены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты диссертационной работы представлены более чем в 27 печатных публикациях, в том числе 3 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК, в том числе категории К1, 9 – в изданиях, индексируемых в Web of Science и/или в Scopus, в том числе уровня Q2. На 4 программные системы, разработанные в ходе диссертационного исследования, получены свидетельства Роспатента.

Содержание диссертации изложено в последовательной форме. Стил изложения в ясный и последовательный. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат соискателя в полной степени отражают ее наиболее существенные положения, выводы и рекомендации.

## **5. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при моделировании динамических систем. Данная задача возникает в различных областях науки и техники: в химической и металлургической промышленности, экологии, экономике и т.п. Применение предложенных в диссертационной работе подходов позволит получить модели, удобные для последующего анализа поведения динамической системы и управления ею.

Предложенные подходы могут быть применены исследователями из прикладных областей при необходимости решения задачи поиска модели по экспериментальным данным.

## **6. Замечания и недостатки**

В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако, следует отметить следующие недостатки:

1. Представляет интерес рассмотрение других методов символьной регрессии, среди которых можно отметить декартово генетическое программирование, грамматическую эволюцию.

2. Недостаточно обоснован выбор математических функций, составивших функциональное множество алгоритма генетического программирования.

3. Из текста диссертации при реализации алгоритма генетического программирования неясно как производится типизация вершин деревьев, ведь при выполнении оператора кроссинговера могут быть синтезированы синтаксически некорректные решения.

4. Непонятно каким образом производится распараллеливание процесса поиска и какие для этого используются вычислительные системы.

5. Недостаточно корректно реализовано сравнение с непараметрической ядерной оценкой регрессии, так как данному методу в явном виде не передаются характеристики, указывающие на то, что исходные данные представляют собой временной ряд.

Отмеченные замечания носят частный характер и направлены, в первую очередь, на дальнейшее развитие представленного исследования.

## **7. Выводы**

Работа Карасевой Татьяны Сергеевны на тему «Эволюционные алгоритмы решения задач символьной регрессии для идентификации динамических систем», представленная на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, является самостоятельной, завершённой научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне и имеющей практическую и теоретическую значимость. Работа является актуальной и имеет важное научное и практическое значение для теории и практики системного анализа, управления и обработки информации. Диссертация, соответствует, паспорту специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Представленная диссертационная работа отвечает требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в редакции от 11 сентября 2021 г., предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Карасева Татьяна Сергеевна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Отзыв подготовлен Курейчиком Владимиром Викторовичем, доктором технических наук по специальностям: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, профессором, заведующим кафедрой систем автоматизированного проектирования Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (347922, г. Таганрог, пер. Никрамовский 44, к. 435 тел. (8634) 383451, e-mail: vkur@sfedu.ru).

Отзыв ведущей организации о диссертационной работе Карасевой Татьяны Сергеевны на тему «Эволюционные алгоритмы решения задач символьной регрессии для идентификации динамических систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, обсужден и утвержден на заседании кафедры систем

автоматизированного проектирования Института компьютерных технологий и информационной безопасности федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», протокол № 4 от 15 ноября 2023 г.

Заведующий кафедрой  
систем автоматизированного  
проектирования  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
д. т. н., профессор Владимир Викторович Курейчик

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»  
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности  
Адрес: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, к. 435  
Тел: (8634) 3383451  
Адрес эл. почты: vkur@sfedu.ru

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Печенью подписи *В.В. Курейчик*

ЗАВЕРЕНО:

Начальник сектора

*Острисова*  
16 11 20