

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук профессора Марлея Владимира Евгеньевича на диссертацию Мусаева Андрея Александровича «Гибридные алгоритмы прогнозирования многомерных нестационарных процессов в задачах проактивного управления сложными техническими объектами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы).

### 1. Актуальность диссертационной работы

Проблема прогнозирования нестационарных процессов является крайне актуальной и до сих пор до конца не решенной. Это связано с тем, что в условиях нестационарности нарушается основополагающее положение всей вероятностно-статистической парадигмы – условие повторяемости опыта в идентичных условиях. Следствием этого является не выполнение ограничений, при которых справедливы условия состоятельности и оптимальности традиционных статистических оценок.

С другой стороны практически все реальные информационные процессы являются нестационарными. Традиционным выходом из создавшегося положения является использование аддитивных моделей наблюдений, в которых системная составляющая представлена неизвестным детерминированным процессом, а случайная компонента – стационарным случайным процессом. Тем самым процесс сводится к обработке шумов наблюдений, стационарных относительно системной составляющей. Описанный подход является основным в современной теории прогнозирования, однако в ряде ситуаций он оказывается недопустимым упрощением. В частности, при мониторинге нестабильных объектов системная компонента рядов наблюдений не может быть представлена детерминированным процессом в силу хаотической природы моделируемой системы. В частности, такая ситуация имеет место для турбулентных гидро- и газодинамических процессов.

Для преодоления указанной проблемы в диссертационной работе предложена аддитивная модель, в которой системная составляющая представляет собой реализацию хаотического процесса (в терминах концепции динамического хаоса), и случайная – нестационарного случайного шума. Данная модель является новой и определяет содержание всей диссертации, посвященной разработке отвечающих ей алгоритмов прогнозирования в интересах систем проактивного управления нестабильными системами.

При этом модели предложенного типа не допускают аналитических выводов и предполагают эмпирические решения, эффективность которых подтверждается имитационным моделированием. В диссертационной работе предложено оригинальное решение на основе гибридных алгоритмов, в котором базовая компонента, основанная на модификациях методов

многомерного статистического анализа, непрерывно корректируется средствами современной компьютерной математики, относящихся к технологиям интеллектуального анализа данных (ИАД, Data Mining). Таким образом диссертационная работа является крайне актуальной и содержит все явные признаки научной новизны и практической значимости.

## **2. Основное содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложений. Во введении представлено обоснование актуальности выбранной темы исследований и изучение степени ее разработанности. Из приведенного обзора вытекает наличие противоречия между традиционными алгоритмами прогнозирования и степенью их пригодности для оперативного проактивного управления нестационарными сложными техническими объектами (НСТО). Выявленное противоречие позволило сформулировать цель исследований и отвечающую ей научную задачу. В работе решена конкретная научная задача, а именно разработаны гибридные алгоритмы прогнозирования многомерных нестационарных процессов для проактивного управления сложными техническими объектами.

В **первой главе** диссертационной работы приведен обзор текущего состояния общей проблемы прогнозирования многомерных случайных процессов с точки зрения приложения к задачам проактивного управления. Подтвержден вывод о несоответствии между математическими моделями, используемых для построения прогностических алгоритмов, и свойствами реальных процессов, протекающих в нестабильных средах погружения. Предложена аддитивная модель наблюдений, в которой изменение параметров состояния сложного технического объекта (СТО) имеет вид колебательных непериодических процессов с множеством непредсказуемых локальных трендов, т.е. описывается моделью динамического хаоса. На основании анализа реальных наблюдений доказано, что случайная составляющая модели наблюдений представляет собой нестационарный коррелированный процесс со слабой сходимостью к гауссовской модели с утяжеленными хвостами распределения.

Для подтверждения указанных свойств модели наблюдений в диссертационной работе проведен статистический анализ рядов наблюдений за реальными процессами, полученными в процессе мониторинга состояния реального технологического процесса (ТП) переработки нефти. Данная задача используется в качестве сквозного примера нестационарного СТО (НСТО). Управление промышленными объектами такого типа предполагает стабилизацию параметров состояния относительно опорных значений, определенных техническим регламентом ТП. Отклонения параметров ТП от заданных регламентов значений приводит к необходимости оперативного корректирующего управления, обеспечивающего стабилизацию технологического режима. В силу нестабильности протекающих в установке газодинамических процессов, параметры состояния и отвечающие им ряды наблюдений, полученные в процессе мониторинга ТП, образуют многомерный нестационарный случайный процесс.

Во второй главе диссертационной работы представлены варианты построения гибридных алгоритмов прогнозирования нестационарных процессов, основанных на сочетании методов статистического и интеллектуального анализов данных. В диссертационной работе рассмотрен гибридный подход, позволяющий средствами ИАД корректировать параметры и структуру базового статистического алгоритма к вариациям вероятностных свойств рядов наблюдений.

Разработаны модификации традиционных алгоритмов статистического прогнозирования, позволяющие адаптировать вычислительные схемы к особенностям задачи проактивного управления НСТО.

В частности, были созданы алгоритмы прогнозирования на основе многомерной линейной регрессии с адаптивным выбором регрессоров и алгоритм, основанный на методе канонических корреляций, позволяющий гибко учитывать влияние корреляционных связей между параметрами состояния, управления и выхода НСТО. Для обеспечения устойчивости функционирования предложенных алгоритмов осуществлен переход к гибридным алгоритмам оценивания, сочетающие рассмотренные выше алгоритмы многомерного статистического анализа с технологией эволюционной оптимизации. При этом осуществляется как параметрическая, так и структурная адаптация алгоритмов прогнозирования.

В заключении раздела рассмотрен вариант построения гибридного алгоритма прогнозирования состояния нестационарного НСТО с корректирующей частью на основе искусственной нейронной сети (ИНН). В работе разработана двухэтапная процедура обучения ИНН, позволившая получить достоверные прогностические оценки.

Решение задачи прогнозирования носит сервисный характер и не позволяет оценить конечный экономический эффект, получаемый в результате применения предложенных алгоритмов в задаче управления НСТО. В связи с этим **в третьей главе 3** диссертации рассмотрена задача оценки терминальной эффективности гибридных алгоритмов прогнозирования путем их интеграции в модели проактивного управления НСТО.

Важным постулатом разработанной методики оценки эффективности алгоритмов прогнозирования является положение о том, в наиболее законченной форме данные оценки выражаются через показатели эффективности системы проактивного управления, для которого они создавались. Данное решение в целом соответствует известному положению системного анализа, утверждающему, что качество функционирования любой искусственной системы в наиболее полной степени оценивается через эффективность иерархически вышестоящей системы, для которой она создавалась.

Представлены три варианта интеграции алгоритмов прогнозирования в систему проактивного управления НСТО: на основе полного перебора вариантов, случайного поиска и алгоритма обратного оценивания. Первый из этих методов позволяет оценить потенциальную точность проактивного управления, но может быть непригодным по критерию оперативности в условиях

быстро изменяющейся динамики состояния входных процессов. Второй способ позволяет оценить эффективность рандомизированных методов проактивного управления. Третий способ, разработанный в диссертации, обладает наибольшей конструктивностью, но применим лишь при условии существования обратного оператора прогнозирования. Новизна предложенных алгоритмов управления состоит в их проактивности, реализуемой путем интеграции процесса формирования управляющих решений с предложенными во второй главе диссертации алгоритмами гибридного прогнозирования.

Сравнительный анализ вариантов управления для рассматриваемого в диссертации примера показал, что применение проактивного управления в сочетании с разработанными в работе гибридными алгоритмами прогнозирования позволяет повысить эффективность управления по сравнению с существующими технологиями ситуационного управления. Так, например, при использовании в качестве оценок эффективности, показателей, принятых для данного типа производства (например, для показателя, характеризующего суммарный выход светлых нефтепродуктов или выход заданной фракции нефтеперегонки), относительное увеличение показателя эффективности достигает 4–8%, что составляет за год для крупнотоннажного производства многомиллионный экономический выигрыш.

Другим очевидным достоинством предложенной схемы проактивного управления является повышение на 15–20% уровня стабилизации значений показателей качества выходной продукции. Этот результат позволяет получить дополнительный экономический эффект за счет повышения стабильности показателей качества выпускаемой продукции.

**В четвертой главе** диссертации приведено описание программной реализации разработанного модульного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) анализа эффективности алгоритмов прогнозирования как элемента проактивного управления СТО. По существу, разработанный комплекс представляет собой модульный конструктор, состоящий из набора связанных специализированных многофункциональных модулей (ФМ). При этом каждая из комплексных задач, решаемых ФМ, разбивается на группы локальных функциональностей, реализующих ответы на частные вопросы, значимые для анализа эффективности алгоритмов прогнозирования и управления.

### **3. Основные результаты диссертационных исследований и их новизна**

В диссертационной работе получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Проведен анализ данных, полученных в процессе мониторинга за состоянием реальных промышленных объектов, связанных с взаимодействием с нестабильными (газо-, гидро- и термодинамическими) средами погружения, обоснована необходимость в разработке алгоритмов прогнозирования, отличающихся возможностью получения эффективного прогноза в интересах задач проактивного управления.

2. Предложены математические модели наблюдений, отличающиеся тем, что позволяют учитывать хаотическую динамику системной составляющей, и нестационарный характер случайной составляющей результатов мониторинга состояния СТО, протекающих в нестабильных средах погружения.

3. Разработаны новые гибридные алгоритмы прогнозирования, отличающиеся тем, что позволяют сочетать достоинства методов статистического анализа данных и вычислительных алгоритмов современной компьютерной математики, относящейся к категории ИАД, и позволяющие получать устойчивые результаты с требуемой точностью прогнозируемых оценок состояния НСТО.

4. Разработана методика и модульный комплекс анализа эффективности алгоритмов прогнозирования в системах проактивного управления НСТО, отличающийся тем, что включает в себя модули анализа и преобразования данных, прогнозирования и управления. Подтверждена результативность предложенных алгоритмов проактивного управления на основе используемых в промышленности критериев эффективности.

#### **4. Степень обоснованности и достоверности научных положений и полученных результатов и рекомендаций**

Обоснованность и достоверность представленных в диссертации решений обеспечивается их глубоким тестированием на основе полигона данных, сформированном на длительном временном интервале мониторинга реального ТП с нестабильной газодинамической средой погружения.

Кроме того, обоснованность полученных в диссертации положений хорошо апробирована на международных и российских научно-технических конференциях и семинарах.

#### **5. Теоретическая и практическая значимость диссертационных исследований**

Теоретическая значимость полученных в диссертации результатов, состоит в создании алгоритмов прогнозирования многомерных нестационарных процессов, обеспечивающих повышение эффективности системы проактивного управления. Кроме того, имеются локальные научные результаты, обладающий самостоятельной теоретической значимостью:

- математические модели рядов наблюдений, отражающих стохастическую динамику вектора состояния СТО для нестабильных сред погружения;
- методика оценки эффективности прогнозирования через терминальные показатели эффективности проактивного управления;
- концепция построения многомодульной СППР, использование которой подтвердило научную обоснованность и эффективность путей решения научно-технической задачи, поставленной в диссертации.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований состоит:

- в создании алгоритмических и программных средств, предназначенных для прогнозирования многомерных нестационарных процессов для проактивного управления НСТО, функционирующих в нестабильных средах погружения;

- в разработке модульного программно-алгоритмического комплекса анализа эффективности алгоритмов прогнозирования как элемента проактивного управления СТО, позволяющего унифицировать решение данной задачи для различных типов систем управления и осуществлять сравнение эффективности алгоритмов прогнозирования через терминальные показатели результативности управления;

- в увеличении функциональной эффективности системы проактивного управления НСТО за счет упреждающего многовариантного прогнозирования на основе применения предложенных в работе гибридных алгоритмов.

### **5. Замечания по диссертационной работе**

Следует отметить следующие замечания, касающиеся рассмотренной диссертационной работы:

1. Ограниченность представленных в качестве примеров приложений. Проблема прогнозирования нестационарных процессов с хаотической системной компонентой крайне важна для широкого спектра других важных практических задач, например, в метеорологии, экономике (анализ рынков), управление турбулентными гидродинамическими потоками и т.п.

2. Недостаточная проработка вопроса, связанного с использованием ИНН. В частности, помимо традиционной схемы с обратным распространением ошибки было бы интересно рассмотреть возможности конкурирующих и эволюционирующих нейронных сетей.

3. Слабо отражена связь проведенных исследований с современными научными трендами в области промышленной автоматизации, таких как концепция Industry 4.0, технологии когнитивного компьютеринга и т.п.

4. Не указаны ограничения предложенных методов прогнозирования на степень инерционности наблюдаемых процессов. Так например, для безынерционных хаотических сред, таких как электронные валютные рынки, предложенные методы вряд ли будут эффективными, поскольку динамика протекающих процессов не оставляет времени для перенастройки параметров алгоритмов прогнозирования.

5. Нет оценки сложности и эффективности разработанных алгоритмов.

Перечисленные замечания диссертационных исследований не существенно влияют на общую положительную оценку проделанной работы.

### **6. Внедрение, апробация и публикация полученных результатов**

Практическая направленность диссертационных исследований подтверждена 4 актами о внедрении полученных результатов на предприятиях АО НПФ «УРАН-СПб», ООО «КИНЕФ», АО «СПИК СЗМА»,

а также в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного технологического института.

Как указано в актах о реализации, материалы диссертационных исследований реализованы:

- при разработке планов развития АСУ ТП,
- при подготовке предложений по созданию системы когнитивного управления ТП с динамической оптимизацией на основе алгоритмов ИАД,
- при создании системы предварительной обработки данных мониторинга состояния оборудования котельных установок,
- при подготовке плана перспективного развития по созданию системы автоматизированного управления теплоэнергетическими установками с использованием ИАД,
- при создании перспективной системы статистического анализа результатов мониторинга состояния НСТО и системы когнитивного управления ТП,
- в учебном процессе при изучении дисциплины «Интеллектуальный анализ данных».

#### **7. Апробация и публикации полученных результатов**

Материалы исследований, представленные в диссертационной работе докладывались и обсуждались на межрегиональных, всероссийских, международных научно-технических конференциях: IEEE Northwest Russia Conf. on Math. Methods in Engineering and Technology (Санкт-Петербург, 2018), 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (Санкт-Петербург, 2019), X International scientific and practical conference «Modern European science - 2014» (Sheffield, 2014), конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 2018), а также на научно-технических семинарах лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИ-ИРАН.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных трудов, в том числе: 6 публикаций в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, утвержденных ВАК («Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)», «Нефтепереработка и нефтехимия», «Известия вузов. Приборостроение.», «Вестник технологического университета»), 2 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus.

#### **8. Соответствие паспорту специальности**

Материалы диссертационных исследований отвечают пунктами паспорта специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации: п.4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.5. «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и

обработки информации», п.10. «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах».

### **9. Заключение**

Диссертация А.А. Мусаева является завершенной научной и квалификационной работой и полностью отвечает требованиям пунктов 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что Мусаев Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01: «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)».

Официальный оппонент  
профессор кафедры вычислительных систем и информатики  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»  
доктор технических наук, профессор

В.Е. Марлей

«08» июня 2021г.

Подпись профессора В.Е. Марлея заверяю.

Почтовый адрес: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.  
Тел. +7(812) 334-38-74  
E-mail: vmarley@mail.ru