

## ОТЗЫВ

официального оппонента Алексева Владимира Витальевича на диссертацию Щербакова Артема Петровича на тему «Разработка методов и алгоритмов рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность темы диссертации.** Достаточно большое количество современных технических и производственных систем характеризуются сложностью структуры и нелинейностью протекания процессов. Это является причиной достаточно серьезной практической проблемы – проблемы выбора математического аппарата для адекватного описания таких процессов. Следует отметить, что исследователю не всегда удается подобрать уже существующий математический аппарат. В силу этого, разработка новых математических методов и алгоритмов, адекватно отражающих характер нелинейности отдельных значимых режимов или всего моделируемого процесса в целом, остается актуальной задачей, несмотря на большое количество уже имеющихся методов и алгоритмов, например, таких, как нейронные сети или деревья регрессии. Основываясь на достаточно глубоком анализе предметной области, автор диссертации обоснованно сделал вывод о том, что перспективным направлением в исследовании свойств и характеристик сложных нелинейных процессов с применением математического моделирования, является применение окрестностных моделей. Диссертация автора посвящена разработке нового класса окрестностных моделей, отличающихся иерархической окрестностной структурой в виде ориентированного дерева с дугами. В диссертации автор много внимания уделил разработке алгоритмов идентификации нелинейных иерархических окрестностных моделей.

Актуальность темы исследования подробно обоснована автором во введении. В теоретической части работы автор продолжает «алгоритмическое» направление применения окрестностных систем, основываясь на анализе источников, посвященных задачам и проблемам окрестностной интерпретации таких математических методов и алгоритмов, как, например, метод сеток, метод конечных элементов, нейронные сети и др. Наиболее важной и интересной частью работы являются предложенный автором математический аппарат последовательного уточнения заданной первоначальной модели посредством рекуррентной идентификации дополнительных слагаемых. Эти слагаемые идентифицируются на основании использования остаточных данных (невязок) предыдущей модели. Корректирующие слагаемые соответствуют вершинам иерархической окрестностной структуры. В результате получается нелинейная иерархическая окрестностная модель процесса.

Таким образом, тема исследования Щербакова А.П. является актуальной и направлена на разработку метода, моделей и алгоритмов идентификации окрестностных моделей для исследования нелинейных процессов, что позволяет расширить возможности их применения в задачах моделирования

производственных процессов и описания вычислительных алгоритмов.

Тематика работы связана с научными направлениями ФГБОУ ВО «ЛГТУ».

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Содержание диссертации, в целом, позволило сделать вывод о том, что автор много внимания уделил обоснованию необходимости разработки: нового класса окрестностных моделей с иерархической окрестностной структурой в виде дерева; метода и алгоритмов рекуррентной идентификации нового класса иерархических окрестностных моделей. В качестве критериев обоснованности автор диссертации принял доступность и удобство использования таких моделей в ряде вычислительных задач, минимизацию объема исходных данных по сравнению с применением других информационных технологий, например нейросетевых.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации без учета приложений составляет 134 страницы. Список литературы состоит из 134 наименований. Иллюстративный материал содержит 24 рисунка и 6 таблиц. Объем приложений составляет 6 страниц.

**В первой главе** диссертации Щербаковым А.П. представлены результаты анализа возможностей различных видов окрестностных моделей, в том числе нелинейных окрестностных моделей и моделей иерархического типа. По результатам анализа автор диссертации справедливо выделяет два основных направления применения окрестностных моделей – технологическое и алгоритмическое. Исходя из этого, им описаны возможности применения окрестностных моделей к решению задач моделирования производственных процессов («технологическое» направление) и интерпретации известных вычислительных методов и алгоритмов («алгоритмическое» направление), окрестностная структура которых не сопоставляется какому-либо производственному процессу.

Определенный научный интерес представляют сведения об оценках прогностической точности алгоритмов решающих деревьев (алгоритмы CART) и основанных на CART ансамблевых методах, с которыми в последующих главах сравниваются предлагаемые в работе рекуррентные иерархические алгоритмы.

**Во второй главе** автор обосновал иерархические окрестностные структуры систем и соответствующие иерархические окрестностные модели. Оригинальным решением автора диссертации явилось уточнение термина «иерархическая окрестностная модель» применительно к используемым автором моделям с древовидной окрестностной структурой. Отличительными особенностями этих моделей являются двусторонние связи и возможность добавления новых узлов. Этот класс моделей определен впервые в теории окрестностных систем и отличается от ранее определенных окрестностных моделей иерархического типа. Также в главе представлено описание процедур иерархической кластеризации и разбиения множества обучающих данных, соответствующих узлам иерархического дерева окрестностной модели. Процесс



построения и использования дерева регрессии в алгоритме решающих деревьев (CART) интерпретирован автором как процесс идентификации и применения иерархической окрестностной модели с нисходящими связями, что справедливо.

К основным результатам второй главы автор относит разработку иерархических окрестностных структур и иерархических окрестностных моделей.

**В третьей главе** представлено описание разработанных автором статического и динамического алгоритмов (R- и L-алгоритмы, соответственно) рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей. Щербаковым А.П. предложен метод анализа остаточных данных выходов в процессе построения моделей для контроля количества уровней иерархии, основанный на использовании автокорреляционной функции остатков. Именно третья глава содержит наиболее важные и оригинальные результаты, в особенности это относится к L-алгоритму и методу контроля количества уровней иерархии в моделях.

Алгоритмы рекуррентной идентификации иерархических моделей представляют собой схему последовательного уточнения некоторой начальной аналитической модели, соответствующей корневому узлу дерева модели. Процесс идентификации модели автором интерпретируется как движение по дереву «сверху-вниз». Отличительной особенностью разработанных алгоритмов является использование методик иерархической кластеризации и разбиения входных данных, определенных автором в диссертации. В главе представлены результаты анализа сходства и различия разработанных алгоритмов с алгоритмом деревьев регрессии (как части CART) и методом бустинга, основанным на CART.

**В четвёртой главе** автор представил результаты исследования, связанные с применением полученных научных результатов. Применение научных результатов автора для построения иерархических окрестностных моделей прогнозирования модульных характеристик клинкера на цементном производстве и прогнозирования температурных режимов стадии диффузии на производстве сахара доказывает, что они обладают определенной общностью. Представленное описание комплекса проблемно-ориентированных программ для идентификации и применения иерархических моделей свидетельствует о программной реализации полученных Щербаковым А.П. научных результатов именно в виде комплекса программ.

В целом научные положения и выводы, представленные в работе, считаю обоснованными и соответствующими заявленным автором цели и задачам исследования, научной новизне, методам и методологии исследования.

**Достоверность и научная новизна результатов.** В диссертации Щербакова А.П. представлены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Предложен класс окрестностных моделей для решения задач моделирования нелинейных процессов в системах.

2. Алгоритм рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей систем основанный на аппроксимации невязок промежуточных



моделей.

3. Алгоритм и численный метод рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей на основе трихотомии невязок промежуточных моделей.

4. Метод анализа остаточных данных промежуточных моделей в алгоритмах рекуррентной идентификации для контроля количества уровней иерархии модели.

5. Комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующих алгоритмы рекуррентной идентификации иерархических моделей.

Достоверность полученных результатов определяется результатами вычислительных экспериментов, проведенными в достаточном объеме с применением современных технологий математического моделирования и корректным использованием методов вычислительной математики, теории графов, математической статистики. Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в 26 публикациях, в том числе 5 в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня. Представлены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и справки о возможности использования результатов работы на различных производствах. Характер публикаций свидетельствует о полноте освещения и апробации всех научных результатов, полученных автором и представленных в диссертации.

**Теоретическая значимость** результатов диссертации заключается в развитии методов, моделей и алгоритмов нелинейного моделирования во взаимосвязи с теоретическими положениями, описывающими окрестностные системы, расширении возможностей применения математического аппарата теории систем для решения задач, связанных с исследованием и созданием систем с нелинейно протекающими процессами. Представленные автором результаты фактически являются решением научной задачи, заключающейся в развитии методов построения моделей сложных процессов с существенно нелинейными характеристиками, имеющей значение для развития теории математического моделирования и теории систем.

**Практическая значимость** результатов диссертации состоит в возможности использования разработанных моделей, метода и алгоритмов для решения прикладных задач, связанных с повышением эффективности технологических и управленческих (алгоритмических) процессов на предприятиях. В частности, разработанные алгоритмы и идентифицированные иерархические окрестностные модели рекомендованы к использованию при планировании и управлении производственными показателями на предприятиях: АО «Липецкцемент» и структурного подразделения «Хмелинецкий сахарный завод», АО «Агропромышленное объединение «Аврора». Результаты диссертации также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» при выполнении индивидуальных заданий по дисциплинам, связанным с математическим моделированием, а также при подготовке курсовых и



выпускных квалификационных работ.

Тема диссертации и результаты исследования соответствуют пунктам 2, 5, 8 паспорта специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Автореферат диссертации в целом отражает содержание диссертации, характеризует результаты проведенных исследований.

#### **Рекомендации и замечания по работе:**

1. В первой главе на с. 19 во фразе «При этом все входы  $u \in U$  имеют только стоки, а все выходы  $w \in W$  – только источники, таким образом, ни входы, ни выходы не являются рефлексивными» предположительно пропущено «При этом, как правило, все входы...» поскольку далее на с. 20 рефлексивные входы и выходы анализируются и приводится графический пример.

2. В первой главе на с. 31 присутствует фраза «Симметричные окрестностные системы, например, удобно описывают рассмотренные в [50] конструкции» неудачна. Следовало бы написать «С помощью симметричных окрестностных систем можно описывать рассмотренные в [50] конструкции».

3. Во 2 главе в описании схемы разбиения единицы (с. 48) термин «одноуровневая схема» следовало объяснить подробнее, поскольку он противоречит тому, что обсуждается ситуация с произвольным количеством уровней.

4. В названии диссертации говорится об «алгоритмах рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей». При этом далее в тексте иногда порядок слов меняется и говорится об «алгоритмах рекуррентной иерархической идентификации». Из контекста ясно, что это одно и то же, но, возможно, следовало унифицировать терминологию.

5. Следует ли предполагать, что применение моделей, построенных с помощью L-алгоритма (в 4 главе) в большинстве случаев позволяют получить результат лучше моделей, построенных с помощью R-алгоритма. Возможно, следовало бы посвятить сравнению алгоритмов отдельный пункт диссертации.

Указанные рекомендации и замечания не ставят под сомнение научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов диссертации Щербакова А.П., их достоверность, а связаны с критическим ее рассмотрением.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук**

Диссертация Щербакова А.П. «Разработка методов и алгоритмов рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей» написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую в себе решение научной задачи разработки метода, моделей и алгоритмов рекуррентной идентификации иерархических окрестностных моделей, анализа остаточных данных для моделирования процессов с нелинейным поведением, имеющей существенное значение для развития теории математического моделирования и теории систем, соответствует критериям, изложенным в пп. 9, 11, 13 и 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Щербаков Артем

Петрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Даю согласие на передачу и обработку моих персональных данных, представляемых в диссертационный совет 24.2.323.01 на базе ФГБОУ ВО «ЛГТУ».

Официальный оппонент:  
профессор кафедры «Информационные системы и защита информации»  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

доктор технических наук,  
профессор

 В.В. Алексеев

«26» февраля 2024 г.

Алексеев Владимир Витальевич, д.т.н. (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ).  
Почтовый адрес (рабочий): Российская Федерация. 392000, г. Тамбов, ФГБОУ ВО «ЛГТУ», ул. Советская, д.106/5, помещение 2. Телефон рабочий: +7 (4752) 63-92-86. Эл. почта: [vvalex1961@yandex.ru](mailto:vvalex1961@yandex.ru).

