

## ОТЗЫВ

официального оппонента Провоторова Вячеслава Васильевича на диссертацию Попова Романа Валерьевича на тему «Разработка методов и алгоритмов структурной идентификации и структурных преобразований 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

Окрестностные модели или системы в настоящее время успешно используются для описания различных сложных технологических процессов и объектов. Хотя с формально-математической точки зрения окрестностные системы могут рассматриваться как обычные системы управления в пространстве состояний, эти системы имеют ряд особенностей, позволяющих выделять их в отдельный класс. Во-первых, эти системы являются сильно разреженными по вхождению переменных в правые части уравнений (в этом смысле их аналогом является класс разреженных матриц) и, во-вторых, замены переменных, широко используемые при изучении систем в пространстве состояний, в случае окрестностных систем неприменимы. Оба обстоятельства связаны с тем, что важной первичной составляющей окрестностной модели является «оснащенный» орграф – орграф, с вершинами которого связаны переменные или наборы переменных. Назначение этого орграфа состоит в формализации технологической схемы производства, при этом сама окрестностная система как система уравнений является надстройкой над оснащенным орграфом, тип этой системы (линейная, нелинейная, статическая, динамическая и т.д.) можно выбирать в зависимости от поставленной задачи и целей. Универсальность и гибкость класса окрестностных моделей имеет обратную сторону: эти модели, синтезируемые, как правило, в режиме «черного ящика», часто содержат очень большое количество параметров, для идентификации которых (и удаления незначимых параметров) требуется большое количество экспериментальных данных, получение которых может быть затратным. По этой причине возникает следующая актуальная задача окрестностного моделирования: уменьшить количества параметров окрестностной модели уже на этапе структурной идентификации, то есть в процессе построения оснащенного орграфа модели. Здесь важно отметить, что в процессе структурной идентификации допустимы структурные преобразования первоначального оснащенного орграфа, именно это обстоятельство и предлагается использовать в диссертации для редукции количества параметров.

### Степень обоснованности научных положений,

### выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Понятие параметрической идентификации моделей, линейно зависящих от параметров, основано на использовании уравнения множественной регрессии и

потому в данном контексте имеет однозначно определенный математический смысл. Напротив, по поводу понятия структурной идентификации в литературе можно найти много несовпадающих трактовок, зависящих от рассматриваемых классов моделей. В данном исследовании предложено четкое определение этапа структурной идентификации для одного определенного класса моделей, а именно, для окрестностных моделей. На основе этого определения разработан алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной модели позволяющий уменьшать количество параметров уже на этапе структурной идентификации, а не в результате оценки статистической значимости в процессе параметрической идентификации. Это позволяет уменьшить необходимое количество экспериментальных данных в тех случаях, когда получение большого количества данных пассивного эксперимента невозможно или является затратным. Кроме того, в этап структурной идентификации включено вычисление введенного автором вектора параметрической валентности и матрицы минимального плана экспериментов для получения данных, достаточных для однозначной параметрической идентификации. В этом случае для уменьшения количества измерений существенным образом используются неполные corteжи данных (когда измеряются состояния не всех вершины), что возможно благодаря сильной разреженности окрестностных систем. Таким образом, сокращение количества необходимых экспериментальных данных происходит в двух разных направлениях: за счет редукции количества параметров и за счет уменьшения количества измерений состояний вершин.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в теоретической части диссертации Попова Романа Валерьевич, базируются на корректном применении общепризнанных научных методов и положений, в частности, методов теории математического моделирования, теории систем, теории графов, вычислительной математики. В целом, содержание диссертационной работы как в теоретической, так и в практической части представляется обоснованным и достоверным.

### **Достоверность и новизна**

Несомненной научной новизной характеризуются следующие результаты:

1. Разработан модифицированный метод структурной идентификации окрестностных моделей, отличающийся использованием введенных в работе понятий смешанной окрестностной структуры и параметрической валентности окрестностной модели и позволяющий повысить информативность этапа структурной идентификации.

2. Разработан алгоритм вычисления параметрической валентности полилинейных окрестностных моделей, отличающийся наличием блоков для моделей, полилинейных по всем переменным или только по связям и позволяющий вычислять матрицу плана экспериментов для получения минимального количества данных, необходимых для однозначной параметрической идентификации модели.

3. Введен класс окрестностных моделей, отличающихся наличием нескольких взаимодействующих подсистем (окрестностные мультимодели) и

разработан алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной мультимодели, позволяющий уменьшить количество идентифицируемых параметров на этапе структурой идентификации.

4. Разработан численный метод идентификации информационных связей окрестностной модели, отличающийся комплексным применением линеаризации и псевдообращения вблизи номинального режима и позволяющий решать задачи стабилизации и коррекции выхода модели.

5. Разработано программное обеспечение, отличающееся наличием модулей, реализующих разработанные алгоритмы скалярной декомпозиции, вычисления параметрической валентности, численный метод идентификации информационных связей и позволяющее повысить эффективность этапа структурной идентификации.

Достоверность результатов работы подтверждается проведенными в достаточном объеме исследованиями с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента. Разработанные методы и алгоритмы были применены для исследования реальных объектов – поддержания заданных параметров микроклимата, так и для более эффективного расходования ресурсов микроклимата теплицы. Анализ полученных результатов во всех случаях показал соответствие производственным данным.

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость выполненной работы заключается в разработке алгоритма скалярной декомпозиции окрестностной модели, а также алгоритмов для определения параметрической валентности окрестностной модели и формирования матрицы планирования экспериментов на основе параметрической валентности.

Считаю, что заключение диссертанта о теоретической значимости его работы, представленное в соответствующих разделах диссертации и автореферата соответствует научному уровню полученных результатов.

**Ценность данной работы для практики.** Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке модели, обеспечивающей управление микроклиматом теплицы в соответствии с установленными технологическими нормами температуры, влажности, освещенности и с учетом внешних погодных условий. Результаты работы рекомендованы для дальнейшего изучения и применения в деятельности МУП «Зеленхоз» и АО Агропромышленное объединение «Аврора», что подтверждается соответствующими актами.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» в рамках образовательной программы по направлению 01.03.03 «Механика и математическое моделирование» при выполнении индивидуальных заданий по дисциплинам «Математическое моделирование», «Численное и аналитическое моделирование в интегрированных математических пакетах», а также при подготовке выпускных квалификационных работ.

### Замечания по работе

1. Замечание по главе 1. Пояснение к формуле 1.2 о том, что «индекс  $i$  изменяется так же, как в системе 1.1» (страница 22) – лишнее, в формуле 1.2 уже указано как изменяется индекс  $i$ .
2. Замечание по главе 2. На странице 38 используется фраза: «В некоторых задачах структурной идентификации направления действия отдельных связей ...», было бы лучше: «В некоторых случаях на этапе структурной идентификации направления действия отдельных связей ...». Поскольку у автора везде в тексте **задачей** является построение модели, а структурная идентификация – это первый **этап** решения этой задачи.
3. Замечание по главе 2. Вычисление матрицы минимального плана экспериментов по орграфу с заданными параметрическими валентностями вершин следовало бы пояснить конкретным примером и соответствующим рисунком.
4. Замечание по главе 3. Алгебраическое описание скалярной декластеризации (страница 64) следовало бы пояснить рисунком, из которого читателю было бы проще уяснить, что подразумевается под терминами «блок» и «крест».
5. Замечание по главе 3. Матрица возможных связей, определяемая на странице 64, в общем случае не симметрична. В то же время матрица возможных связей, вычисляемая по матрице принадлежности переменных подсистемам (страницы 65-66) симметрична. Следовало бы объяснить это несовпадение свойств.
6. Замечание по главе 4. На странице 110 написано, что значение критерия Колмогорова  $D=0.701$ , в то время как на рисунке 4.8 (скриншот из STATISTICA) читаем:  $D=0,1238$ . Следовало бы пояснить почему численные значения критерия различные.

Указанные замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертации.

### Заключение

Диссертационная работа Попова Романа Валерьевича «Разработка методов и алгоритмов структурной идентификации и структурных преобразований окрестностных моделей» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Работа содержит решение научных задач, имеющих значение для развития теории математического моделирования и теории окрестностных систем.

Содержание диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым Положением ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Материал диссертации изложен ясно, работа хорошо структурирована.

Аннотация правильно отражает содержание диссертации. Основные научные результаты достаточно полно отражены в 13 публикациях, в том числе

в 3 по Перечню изданий ВАК.

Диссертация «Разработка методов и алгоритмов структурной идентификации и структурных преобразований окрестностных моделей» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, автор диссертации Попов Роман Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Даю свое согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры уравнений в частных  
производных и теории вероятностей  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Воронежский государственный университет»



В.В. Провоторов

Провоторов Вячеслав Васильевич

тел.: 8 950-758-15-14, e-mail: wwprov@mail.ru

Адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1,

ФГБОУ ВО «ВГУ», математический факультет,

кафедра уравнений в частных производных и теории вероятностей

