

На правах рукописи



Попов Роман Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ
ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 1.2.2 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Липецк – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: **Шмырин Анатолий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Липецкий государственный технический
университет», заведующий кафедрой высшей
математики, г. Липецк

Официальные оппоненты: **Громов Юрий Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор, директор
института автоматизации и информационных
технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный технический университет»,
г. Тамбов

Провоторов Вячеслав Васильевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры уравнений в
частных производных и теории вероятностей
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», г. Воронеж

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «**Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет**», г. Белгород

Защита диссертации состоится 16 мая в 14:00 на заседании диссертационного
совета 24.2.323.01 в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический
университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический университет» и на сайте www.stu.lipetsk.ru.

Автореферат разослан «27» марта 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.323.01
д.т.н., доцент



И.А. Седых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из перспективных направлений моделирования сложных распределенных процессов, характерных для современных производств, является окрестностное моделирование. Методы окрестностного моделирования и соответствующие задачи идентификации и управления рассматривались в работах С.Л. Блюмина, А.М. Шмырина, Н.Н. Карабутова, И.А. Седых и других авторов.

Окрестностное моделирование основано на формализации технологической схемы производственного процесса в виде окрестностной структуры – орграфа с наборами переменных в вершинах. Окрестностной структуре может быть поставлена в соответствие «формальная» окрестностная система, в которой заданы только наборы входящих в уравнения системы переменных. Дальнейшая конкретизация окрестностной системы включает выбор типа уравнений (статические или динамические, линейные или нелинейные) и идентификацию параметров уравнений в предположении линейной зависимости уравнений от этих параметров. Таким образом, процесс построения окрестностной модели разделяется на два этапа – структурную идентификацию, включающую выбор типов уравнений, и параметрическую идентификацию.

Как правило, количество параметров, соответствующее построенной окрестностной структуре, велико и потому для параметрической идентификации требуется большое количество экспериментальных данных. Кроме того, большое количество параметров может избыточно усложнять окрестностную модель и ее дальнейшую реализацию на программном или аппаратном уровне. Уменьшить количество параметров можно на этапе параметрической идентификации путем исключения из уравнений статистически незначимых слагаемых, но для этого требуется дальнейшее увеличение количества экспериментальных данных и, кроме того, при таком формальном подходе могут быть ошибочно удалены важные для модели предикторы. По этой причине актуальной задачей теории окрестностного моделирования является разработка алгоритмического обеспечения, предназначенного для преобразования первоначальной окрестностной структуры с целью упрощения (редукции) модели и уменьшения количества параметров уже на этапе структурной идентификации, то есть до параметрической идентификации.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию различных задач, возникающих на этапе структурной идентификации окрестностных систем, были посвящены работы А.М. Шмырина, Н.Н. Карабутова, Ю.Ю. Громова, И.А. Седых, В.В.Семиной, С.С.Роевко и других авторов. В работах В.В. Семиной для случая, когда моделируемый процесс может быть разделен на два одновременно протекающих и взаимодействующих между собой подпроцесса, был предложен алгоритм расщепления и склеивания, позволяющий уменьшать количество параметров на этапе структурной идентификации. Попытки обобщения алгоритма

В.В.Семиной на случай произвольного количества подсистем не привели к достаточно эффективному результату ввиду неоправданной сложности возникающих на этом пути конструкций. В контексте децентрализованных систем управления, которые могут быть интерпретированы как окрестностные системы, структурные преобразования, а именно методы разделения на подсистемы (безотносительно к задаче уменьшения количества параметров) рассматривались, например, в работах Д.Шильяка (университет Санта-Клара), Л.Г.Шатихина и других.

Практическая задача, возникающая в связи со сказанным выше, состоит в повышении эффективности окрестностного моделирования на этапе структурной идентификации за счет уменьшения количества параметров модели на основе анализа окрестностной структуры.

Научная задача, следующая из сформулированной практической, состоит в разработке методов и алгоритмов структурного преобразования окрестностной модели и соответствующего программного обеспечения для решения задачи уменьшения количества параметров до этапа параметрической идентификации.

Тематика работы соответствует научным направлениями ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»: «Исследование и разработка методов и алгоритмов прикладной математики для идентификации технологических и сопровождающих процессов» и «Современные сложные системы управления».

Объект исследования: структурная идентификация окрестностных моделей на основе построения орграфа с переменными в вершинах, формализующего технологическую схему моделируемого объекта.

Предмет исследования: методы и алгоритмы структурных преобразований окрестностной модели, позволяющие уменьшить количество параметров до этапа параметрической идентификации.

Целью работы является повышение эффективности окрестностного моделирования на этапе структурной идентификации за счет применения разработанных методов и алгоритмов структурных преобразований окрестностных моделей.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обзор и анализ понятий окрестностной модели, структурной и параметрической идентификации окрестностных моделей, информационных связей, обзор имеющихся в литературе методов структурной идентификации и структурных преобразований окрестностных моделей.

2. Модернизация понятий окрестностной структуры и структурной идентификации окрестностных моделей с введением класса смешанных окрестностных структур и понятия параметрической валентности окрестностной модели;

3. Разработка класса окрестностных моделей, отличающихся наличием нескольких взаимодействующих подсистем на одной окрестностной структуре (окрестностные мультимодели);

4. Разработка алгоритма скалярной декомпозиции окрестностной модели, алгоритма вычисления параметрической валентности и численного метода идентификации информационных связей окрестностной модели;

5. Разработка комплекса проблемно-ориентированных модулей программного обеспечения, реализующих алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной модели, алгоритм вычисления параметрической валентности и численный метод идентификации информационных связей в окрестностных моделях.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

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 структурной 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.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии подходов математического моделирования на основе методов и алгоритмов, предложенных в работе.

Практическая значимость результатов работы заключается в реализации разработанных методов и алгоритмов в виде комплекса модулей программного обеспечения, позволяющих решать задачу редукции количества параметров окрестностной модели на этапе структурной идентификации.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в ходе работы над диссертационным исследованием использовались методы теории математического моделирования, вычислительной математики, теории графов, математической статистики, математические пакеты MATLAB и STATISTICA.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2:

1. Разработка алгоритма скалярной декомпозиции окрестностной модели, алгоритма вычисления параметрической валентности и матрицы плана экспериментов - соответствует пункту 5 «Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей».

2. Разработка комплекса проблемно-ориентированных модулей программного обеспечения, реализующих алгоритм скалярной декомпозиции, алгоритм вычисления параметрической валентности и численный метод идентификации информационных связей - соответствует пункту 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Положения, выносимые на защиту:

1. Модернизированный метод структурной идентификации окрестностной модели, включающий использование смешанных окрестностных структур и вычисление параметрической валентности модели.

2. Алгоритм вычисления параметрической валентности полилинейных окрестностных моделей, алгоритм вычисления матрицы плана экспериментов для получения минимального количества данных, необходимых для однозначной параметрической идентификации модели.

3. Класс окрестностных моделей с несколькими взаимодействующими подсистемами (окрестностные мультимодели) и алгоритм скалярной декомпозиции окрестностных мультимоделей, позволяющий уменьшать количество идентифицируемых параметров модели на этапе структурной идентификации.

4. Численный метод идентификации информационных связей окрестностной модели и основанные на нем методы стабилизации номинального режима и коррекции выхода модели.

5. Комплекс проблемно-ориентированных модулей программного обеспечения, реализующих алгоритм скалярной декомпозиции, алгоритм вычисления параметрической валентности и численный метод идентификации информационных связей.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов для окрестностных моделей с произвольным количеством подсистем подтверждается их совпадением с результатами, полученными ранее в частном случае двух подсистем другими авторами другим методом.

Теоретические и практические результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA2020 (Липецк, 11-13 ноября 2020 г.); Международная научно-практическая конференция «Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование» (Липецк, 27-28 февраля 2023 г.); «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук Липецк (Липецк, 12 октября 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование» (Липецк, 27-28 февраля 2024 г.); 4th International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2024 (Липецк, 20-21 июня 2024 г.); SUMMA2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (Липецк, 11-13 ноября 2024 г.); областных региональных конференциях, а также на научных семинарах кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

Внедрение результатов работы. Теоретические результаты диссертации используются в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «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. Практические результаты диссертационной работы рекомендованы к дальнейшему рассмотрению и использованию МУП «Зеленхоз» и АО Агропромышленное объединение «Аврора», что подтверждено соответствующими актами.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 13 печатных трудах, в том числе 6 – самостоятельно. Из них 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных в Перечне ВАК, 3 статьи в изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и Web of Science, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В работах, написанных в соавторстве и приведенных в автореферате, лично соискателем получены следующие результаты: [1] – разработка смешанных окрестностных структур и двух классов полилинейных моделей; [2] – разработка окрестностной модели микроклимата теплицы; [4] – программное обеспечение алгоритма последовательного проектирования; [5,6] – разработка асинхронных окрестностных моделей. [7,8] – программное обеспечение окрестностных моделей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и 2 приложений на 12 страницах. Объем основной части работы составляет 130 страниц, включая 51 рисунок и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов и основное содержание работы.

Первая глава содержит обзор теории окрестностного моделирования. Описаны окрестностные структуры и окрестностные системы как составляющие окрестностной модели $(\mathcal{D}, \mathcal{V}, S)$, где $\mathcal{D}$ - орграф, $\mathcal{V}$ - оснащение его вершин переменными и S - окрестностная система. Рассмотрены основные этапы окрестностного моделирования, задачи структурной и параметрической идентификации и имеющиеся в литературе результаты, связанные со структурными преобразованиями окрестностных моделей. Сформулирована цель исследования и задачи для её достижения.

Во второй главе определяются смешанные (частично ориентированные) окрестностные структуры и матрицы смежности смешанных графов. Описываются варианты преобразования смешанных структур в ориентированные окрестностные структуры и соответствующие преобразования матриц смежности. Вводится понятие параметрической валентности окрестностной модели и понятие минимального плана экспериментов. Описывается алгоритм построения минимального плана экспериментов по орграфу модели и ее параметрической валентности. Рассматриваются два класса полилинейных окрестностных моделей: полилинейные по всем переменным или только по связям. Вычисляется параметрическая валентность полилинейных (по всем переменным или только по связям) окрестностных моделей. Предложен алгоритм ациклической ориентации неориентированной окрестностной структуры.

Параметрической валентностью окрестностной модели называется вектор $N_p = (p_1, \dots, p_n)$, где p_i — это максимальное количество неопределенных параметров по всем уравнениям, относящимся к i -той вершине. Окрестностные модели, как правило, являются сильно разреженными, что позволяет использовать в процессе параметрической идентификации не только полные, но и частичные кортежи данных. Общее минимальное количество $|M|$ измерений состояний вершин для однозначной идентификации модели можно оценить сверху как $|M| \leq np_{\max}$ (где $p_{\max} = \max\{p_i\}$). Для однозначной идентификации уравнений вершины j требуется p_j наборов входящих в эту вершину данных и потому состояние каждой из входящих вершин должно быть измерено не менее чем p_j раз. Поскольку каждая из вершин может быть «донором данных» для нескольких вершин (в том числе для себя самой), то для минимального количества необходимых измерений состояний вершины с номером i имеем

$$d_i = \max \{p_i, \max_{a_{ij}} p_j\}$$

где j пробегает номера всех узлов и выходов, для которых вершина с номером i является «донором». Таким образом, для $|M|$ получаем оценку снизу $d_1 + d_2 + \dots + d_n \leq |M| \leq np_{max}$. Общее количество кортежей p_{max} уменьшить невозможно, но можно минимизировать количество $|M|$ измерений состояний вершин. Описан алгоритм построения «минимального» плана экспериментов, реализующего нижнюю оценку для $|M|$ в виде матрицы N_D плана экспериментов. Эта матрица порядка $p_{max} \times n$ из нулей и единиц, ее строки соответствуют p_{max} кортежам, а единичные элементы соответствуют вершинам, в которых следует провести измерение.

Получены формулы для параметрической валентности двух типов полилинейных моделей в зависимости от орграфа модели и заданной максимальной степени m полилинейных одночленов. Пусть n – число вершин структуры; a_{ij} – элементы матрицы смежности; n_i – количество переменных в оснащении вершины i ; $S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} n_j$ и $k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ – количество и взвешенное количество дуг, входящих в вершину i . Тогда:

- для узлов окрестностной модели, полилинейной по переменным:

$$p_i = n_i (C_{S_i}^1 + C_{S_i}^2 + \dots + C_{S_i}^r), r = \min(m, S_i)$$

- для узлов окрестностной модели, полилинейной по связям

$$p_i = (\sum_{j_1} a_{ij_1} n_{j_1} + \sum_{j_1 < j_2} a_{ij_1} a_{ij_2} n_{j_1} n_{j_2} + \dots + \sum_{j_1 < j_2 < \dots < j_r} a_{ij_1} a_{ij_2} \dots a_{ij_r} n_{j_1} n_{j_2} \dots n_{j_r}), r = \min(m, k_i).$$

Далее можно вычислить матрицу плана экспериментов N_D с помощью описанного в работе алгоритма.

В третьей главе рассматриваются методы и алгоритмы преобразования окрестностных структур, позволяющие уменьшать количество переменных в уравнениях *формальной* окрестностной системы и, соответственно, уменьшать объем экспериментальных данных, необходимых для параметрической идентификации. Таким образом, уменьшение количества переменных происходит до параметрической идентификации, а не в результате оценки их статистической значимости. Наиболее эффективны предлагаемые методы и алгоритмы в случае, когда моделируемый процесс может быть разделен на несколько взаимодействующих между собой процессов или подсистем, реализованных на одной и той же окрестностной структуре. Описывается численный метод идентификации информационных связей, определяются два типа асинхронных окрестностных моделей и описывается структура комплекса программ.

Разработан алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной структуры для уменьшения количества параметров модели на этапе структурной идентификации. Алгоритм состоит из двух этапов: скалярная декластеризация и редукция декластеризованной матрицы смежности.

1. *Скалярная декластеризация матрицы смежности.* Каждый элемент a_{ij} матрицы смежности A_N заменяется блоком из единиц, если $a_{ij} = 1$ или

нулей, если $a_{ij} = 0$. Размерность блока равна $n \times m$, где n и m – числа переменных в i -той и j -той вершинах. В результате получается матрица смежности A_D декластеризованной модели. Размерность матрицы A_D равна числу всех скалярных переменных в модели.

2. *Редукция матрицы смежности декластеризованной модели.* На этом этапе требуется дополнительная информация о зависимости переменных, которая кодируется в виде симметричной матрицы возможных связей V порядка $N \times N$, в которой $v_{ij} = 1$, если i - тая скалярная переменная влияет на j - тую, в случае независимости переменных этот элемент равен нулю. Редукция матрицы смежности декластеризованной модели состоит в переходе от матрицы A_D к матрице скалярной декомпозиции $A_{SD} = V \circ A_D$ где « $\circ$ » – произведение Адамара (поэлементное произведение матриц).

Окрестностная модель называется *мультимоделью* если она состоит из окрестностной структуры и набора двух или более подсистем $S_1, \dots, S_k$ ($k \geq 2$), заданных на этой окрестностной структуре и взаимодействующих между собой. Каждая из скалярных переменных окрестностной мультимодели может принадлежать одной или нескольким подсистемам. Матрицу возможных связей V для переменных окрестностной мультимодели можно построить на основе информации о принадлежности переменных к подсистемам. Эта информация кодируется в виде матрицы S порядка $k \times N$, строки S_i которой соответствуют подсистемам, а столбцы V_j - переменным v_j , при этом $s_{ij} = 1$ если переменная v_j принадлежит подсистеме S_i и $s_{ij} = 0$ если v_j не принадлежит S_i . В матрице V элемент $v_{ij} = 1$, если $V_i V_j > 0$; если $V_i V_j = 0$, то $v_{ij} = 0$.

Для динамических окрестностных систем определяется два типа преобразования асинхронизации: перехода к модели, в которой в каждый момент времени активны только некоторые из узлов или, в случае мультимоделей, активны только некоторые из подсистем.

Асинхронизация окрестностной модели по узлам:

$$\begin{cases} X_1^{t+1} = X_1^t + u_1^t f_1(X_1^t, \dots, X_n^t) \\ \dots \dots \dots \\ X_n^{t+1} = X_n^t + u_n^t f_n(X_1^t, \dots, X_n^t) \end{cases}$$

где $u_1, \dots, u_n \in \{0; 1\}$ – управление асинхронизацией. Если $(u_1, \dots, u_n) = (1, 1, \dots, 1)$ во все моменты времени, то система становится обычной, синхронной. Если всегда все u_i кроме одного равны нулю, то в системе в каждый момент времени активен только один узел.

Асинхронизация окрестностной мультимодели по подсистемам:

$$\begin{cases} X_1^{t+1} = X_1^t + u_1 f_{11}(X_1^t, \dots, X_n^t) + \dots + u_m f_{1m}(X_1^t, \dots, X_n^t) \\ \dots \dots \dots \\ X_n^{t+1} = X_n^t + u_1 f_{n1}(X_1^t, \dots, X_n^t) + \dots + u_m f_{nm}(X_1^t, \dots, X_n^t) \end{cases}$$

или, в векторных обозначениях,

$$X^{t+1} = X^t + u_1 F_1(X^t) + \dots + u_m F_m(X^t).$$

где $u_1, \dots, u_n \in \{0; 1\}$ – управление асинхронизацией.

В четвёртой главе рассматривается окрестностная модель управления микроклиматом теплицы в связи с особой важностью вопросов, связанных с импортозамещением продукции растениеводства для обеспечения продуктовой безопасности России. Окрестностная модель позволяет решать задачи поддержания агрономически рекомендованного микроклимата, задачи экономии энергетических и водных ресурсов

Орграф окрестностной структуры модели микроклимата теплицы представлен на рисунке 1. Окрестностная структура содержит два входа: *внешние факторы*(E), *агрономический регламент* (A), и шесть узлов: *микроклимат* (M), *система вентиляции* (V), *система полива* (W), *система отопления* (H), *система досвечивания* (L) и *фрамуги* (F).

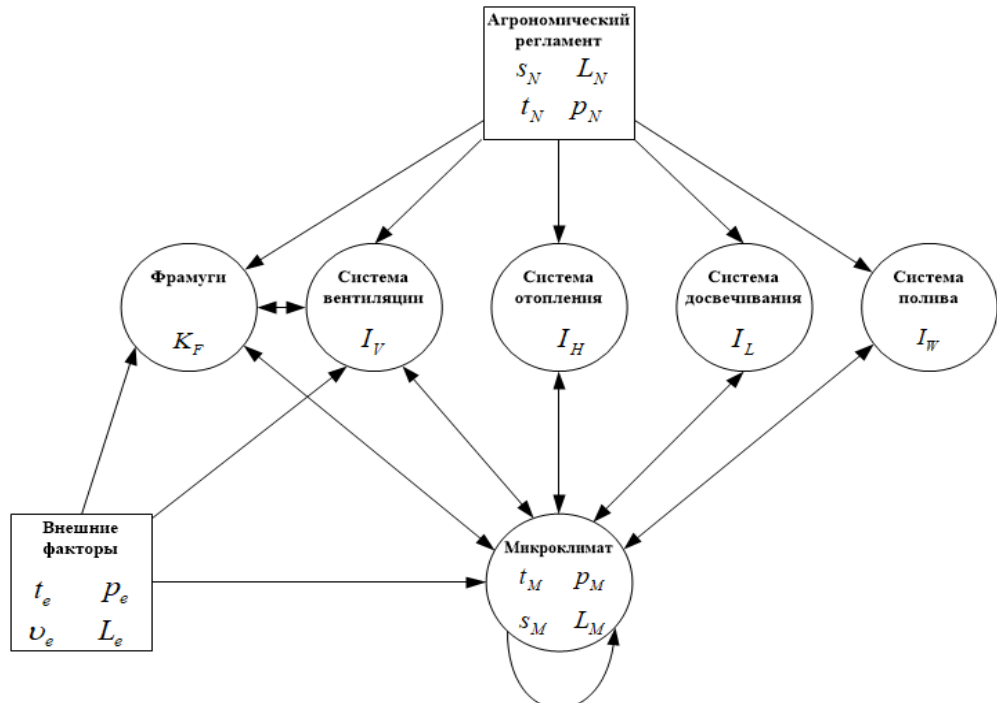


Рисунок 1 – окрестностная структура микроклимата теплицы
Формальная окрестностная система имеет вид:

$$\begin{cases} t_M = F_{Mt}(t_E, v_E, p_E, L_E, p_M, s_M, L_M, I_V, I_W, I_H, I_L, K_F) \\ p_M = F_{Mp}(t_E, v_E, p_E, L_E, t_M, s_M, L_M, I_V, I_W, I_H, I_L, K_F) \\ s_M = F_{Ms}(t_E, v_E, p_E, L_E, p_M, t_M, L_M, I_V, I_W, I_H, I_L, K_F) \\ L_M = F_{Mt}(t_E, v_E, p_E, L_E, p_M, s_M, t_M, I_V, I_W, I_H, I_L, K_F) \\ I_V = F_{MV}(t_E, v_E, p_E, L_E, p_N, s_N, t_N, L_N, p_M, s_M, t_M, L_M, K_F) \\ I_W = F_{MW}(p_N, s_N, t_N, L_N, p_M, s_M, t_M, L_M) \\ I_H = F_{MH}(p_N, s_N, t_N, L_N, p_M, s_M, t_M, L_M) \\ I_L = F_{ML}(p_N, s_N, t_N, L_N, p_M, s_M, t_M, L_M) \\ K_F = F_{MV}(t_E, v_E, p_E, L_E, p_N, s_N, t_N, L_N, p_M, s_M, t_M, L_M, I_V) \end{cases} \quad (1)$$

Линейная реализации системы (1) содержит 98 коэффициентов, для которых требуется параметрическая идентификация. Для уменьшения числа коэффициентов можно применить алгоритм скалярной декомпозиции.

Окрестностная модель содержит пять подсистем: вентиляция(V), полива(W), отопления(H), освещения(L) и фрамуг(F). Матрица принадлежности переменных к подсистемам имеет следующий вид:

	t_e	p_e	v_e	L_e	s_N	L_N	t_N	p_N	t_M	p_M	s_M	L_M	K_F	I_V	I_H	I_L	I_W
V	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
F	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
H	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
L	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
W	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1

В результате выполнения программы скалярной декомпозиции получаем матрицу декластеризованной модели, матрицу виртуальных связей между переменными окрестностной модели и матрица смежности скалярной декомпозиции.

Матрица декомпозиции																	
	t_e	p_e	v_e	L_e	s_N	L_N	t_N	p_N	t_M	p_M	s_M	L_M	K_F	I_V	I_H	I_L	I_W
t_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
p_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
v_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
L_e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
s_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
L_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
t_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
p_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
t_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
p_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
s_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
L_M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
K_F	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
I_V	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
I_H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
I_L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
I_W	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Матрица виртуальных связей																	
	t_e	p_e	v_e	L_e	s_N	L_N	t_N	p_N	t_M	p_M	s_M	L_M	K_F	I_V	I_H	I_L	I_W
t_e	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
p_e	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
v_e	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
L_e	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
s_N	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
L_N	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
t_N	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
p_N	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
t_M	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
p_M	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
s_M	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
L_M	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
K_F	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I_V	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
I_H	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
I_L	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
I_W	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Матрица декластеризации																	
	t_e	p_e	v_e	L_e	s_N	L_N	t_N	p_N	t_M	p_M	s_M	L_M	K_F	I_V	I_H	I_L	I_W
t_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
p_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
v_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
L_e	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
s_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
L_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
t_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
p_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
t_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
p_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L_M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K_F	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
I_V	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
I_H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
I_L	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
I_W	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Рисунок 2 – матрицы смежности

Формальная окрестностная система после применения алгоритма скалярной декомпозиции будет иметь вид:

$$\begin{cases} t_M = F_{Mt}(t_e, v_e, p_e, p_M, s_M, I_V, I_W, I_H, K_F) \\ p_M = F_{Mp}(t_e, v_e, p_e, t_M, s_M, I_V, I_W, I_H, K_F) \\ s_M = F_{Ms}(p_M, t_M, I_W) \\ L_M = F_{Mt}(L_e, I_L) \\ I_V = F_{MV}(v_e, p_e, p_N, p_M, t_M, K_F) \\ I_W = F_{MW}(s_N, t_M, p_M, s_M) \\ I_H = F_{MH}(t_N, p_M, t_M) \\ I_L = F_{ML}(L_N, L_M) \\ K_F = F_{MV}(v_e, p_e, p_N, p_M, t_M, I_V) \end{cases} \quad (2)$$

Линейная реализация системы (2) содержит 44 коэффициента, что значительно меньше, чем до декомпозиции (98 коэффициентов).

Для дополнительного упрощения полученной модели в работе применяется асинхронизация по узлам интенсивностей I_V, I_F, I_H, I_L, I_W . Для этого в матрицу $4 \times \infty$ текущих номинальных режимов p_N, t_N, s_N, L_N , заданных для каждого интервала времени $\Delta T = 3 \text{ часа}$, добавляются строки множителей активности подсистем $u_V, u_F, u_H, u_L, u_W \in \{0,1\}$. Для каждой из подсистем вычисляется значение интенсивности, обеспечивающее изменение соответствующей переменной от текущего значения до номинального. Применение физических законов позволяет дополнительно уменьшить количество параметров в уравнениях. Везде далее $r(x) = \max(0, x)$. Уравнения для I_H, I_L, I_W имеют вид:

$$I_H \approx k_H^1 r(t_N - t_M) + k_H^2 r\left(\frac{t_M + t_N - 2t_e}{2}\right)$$

где k_H^1 (кВт-час/градус) – расход энергии для нагрева теплицы на один градус за час без учета теплопотерь и k_H^2 (кВт/градус) – коэффициент теплопотерь при измерении времени в часах, теплопотери вычисляются приближенно, относительно средней температуры в теплице;

$$I_W = u_W k_W r(S_N - S_M)$$

где k_W - количество воды, увеличивающее влажность почвы на 1% за 3 часа;

$$I_L = u_L k_L r(L_N - L_M)$$

где k_L – мощность подсветки, поднимающая уровень на 1% за 3 часа.

Имитационная модель микроклимата теплицы разработана на языке программирования MATLAB. При запуске программы открывается графический интерфейс пользователя (рис. 3), который отображает

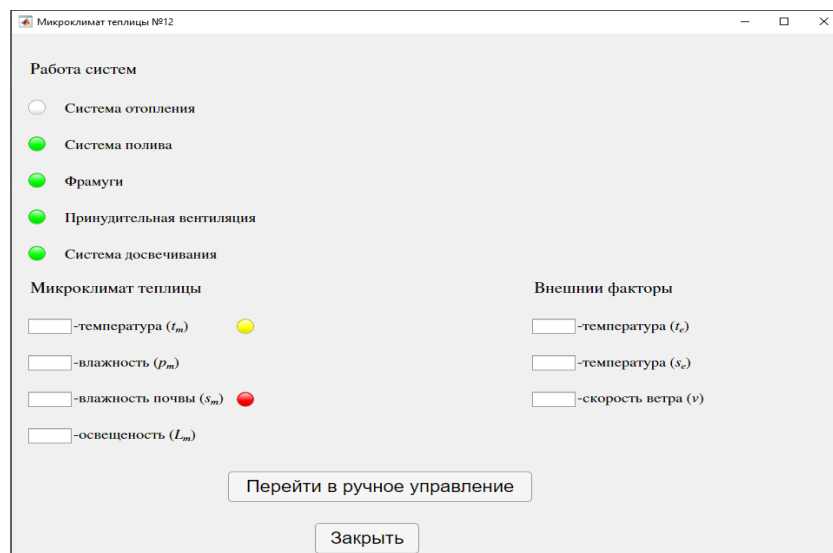


Рисунок 3 – Графический интерфейс программы для контроля микроклимата теплицы

- Состояние систем управления: работа систем визуализируется с помощью зелёного индикатора, а их неактивное состояние — белым индикатором. Это позволяет пользователю в реальном времени отслеживать, какие подсистемы (например, отопление, вентиляция, полив) функционируют в данный момент.

- Параметры микроклимата теплицы: текущие значения температуры, влажности, освещённости и других параметров. Если значения находятся в

пределах допустимых норм, индикаторы отсутствуют. В случае отклонения параметров от нормы, индикатор подсвечивается жёлтым цветом для некритичных ситуаций или красным цветом для критических отклонений. При критическом состоянии программа автоматически предлагает пользователю перейти в режим ручного управления для устранения возникших проблем.

С целью минимизации расхода энергоресурсов на основе имитационной модели решалась задача минимизации функционала $E_H + E_V + E_L \rightarrow \min$ где E_H, E_V, E_L – расходы энергии на отопление, вентиляцию и подсвечивание. Энергозатраты с 10 марта 2023 года по 10 апреля 2023 года вычисленные с помощью имитационного моделирования по заданному агро регламенту составили 80-88% от данных МУП «Зеленхоз».

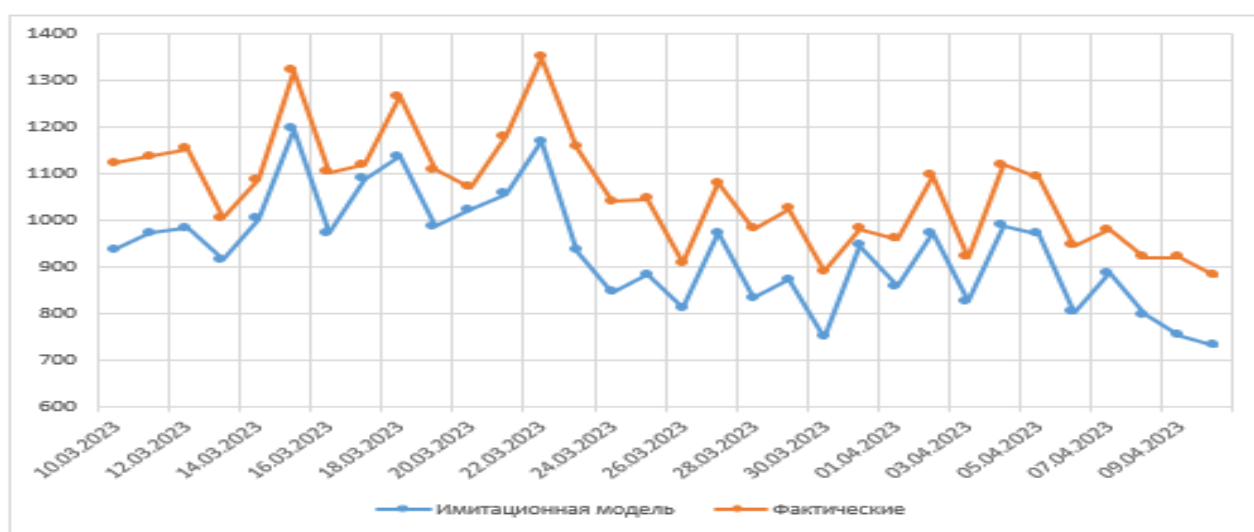


Рисунок 4 – сравнение расчетов по имитационной модели и фактического энергопотребления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработан модифицированный метод структурной идентификации окрестностных моделей, включающий использование введенных в работе смешанных окрестностных структур и параметрической валентности модели.
2. Разработаны алгоритмы вычисления параметрической валентности и матрицы минимального плана экспериментов, позволяющие уменьшить в среднем на 10-30% (в зависимости от орграфа модели) количество экспериментальных данных для параметрической идентификации.
3. Введен класс окрестностных мультимоделей, описывающих нескольких взаимодействующих подсистем и разработан алгоритм скалярной декомпозиции, позволяющий уменьшить в среднем на 20-50% количество параметров мультимодели на этапе структурной идентификации.
4. Разработан комплекс программ, реализующих представленные в работе алгоритм скалярной декомпозиции, алгоритм вычисления

параметрической валентности и численный метод идентификации информационных связей, позволяющий сократить время расчётов на 16-30%.

5. Разработанные методы и алгоритмы применены для построения окрестностной модели регулирования микроклимата теплицы. Анализ результатов имитационного моделирования на основе разработанной модели и данных, представленных МУП «Зеленхоз» показал возможность снижения энергозатрат на 12-20%.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанный в ходе выполнения диссертационной работы комплекс программ целесообразно применять для окрестностного моделирования нескольких взаимодействующих процессов. Дальнейшая разработка темы может быть связана с изучением возможности интеграции разработанных методов с нейросетевыми алгоритмами.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Шмырин, А.М. Смешанные окрестностные структуры и полилинейные системы / А.М. Шмырин, Р.В. Попов, Н.М. Мишачев // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 1 (91). – С. 96-100.

2. Попов, Р.В. Структурная идентификация окрестностной модели микроклимата теплицы / Р.В. Попов, А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 4 (94). – С. 18-21.

3. Попов, Р.В. Алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной структуры // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20. № 1. – С. 14-19. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.1.002.

Публикации, индексируемые в Scopus и Web of Science

4. Mishachev, N.M. Three versions of sequential projection algorithm and condition numbers of large random matrices / N.M. Mishachev, A.M. Shmyrin, R.V. Popov // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. – 2020. – P. 18-21.

5. Kanyugin, A., Asynchronous Control Systems and Differential Inclusions / Kanyugin, A., Popov, R., Shmyrin, A., Mishachev, N. // 2024 4th International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2024. – 2024. – P. 301-304.

6. Mishachev, N.M. Petri Nets as Zero-Degree Asynchronous Control Systems / N.M. Mishachev, A.M. Shmyrin, R.V. Popov // 2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2024. – 2024. – P. 18-21.

Свидетельства на программы для электронных вычислительных машин

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610952 Российская Федерация. Идентификация билинейной окрестностной системы с минимальным количеством параметров и заданной матрицей корреляций узлов : № 2021682260 : заявл. 28.12.2021 : опубл. 18.01.2022 / И.И. Супрунов, Р.В. Попов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668664 Российская Федерация. Расчет периодов работы управляющих узлов при конвейерной обработке с учетом ограничений на ресурсы : № 2022667546 : заявл. 27.09.2022 : опубл. 11.10.2022 / И.И. Супрунов, Р.В. Попов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Статьи и материалы конференций

9. Попов, Р.В. Полилинейные системы на окрестностных структурах / Р.В. Попов // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 2 (45). – С. 46-53. DOI 10.53015/23049235_2021_2_46.

10. Попов, Р.В. Идентификация векторных полилинейных систем на неориентированных окрестностных структурах / Р.В. Попов // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 3 (49). – С. 28-34. – DOI 10.53015/23049235_2022_3_28

11. Попов, Р.В. Два класса полилинейных окрестностных систем / Р.В. Попов // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование. Сборник статей международной научно-практической конференции. – Липецк, 2023. – С. 320-324.

12. Попов, Р.В. Структурные преобразования окрестностной модели / Р.В. Попов // «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук : материалы областного профильного семинара. – Липецк, 2023. – С. 148-150.

13. Попов, Р.В. Алгоритм скалярной декомпозиции для окрестностной мультимодели / Р.В. Попов // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование. Сборник статей международной научно-практической конференции. – Липецк, 2024. – С. 228-232.