

На правах рукописи



Сёмина Валерия Владимировна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
СЛАБОСВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 2.3.1.

Системный анализ, управление и обработка
информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж-2021

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
Официальные оппоненты:	Жуков Дмитрий Олегович , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», профессор кафедры КБ-8 института комплексной безопасности и специального приборостроения РТУ МИРЭА (г. Москва) Кабулова Евгения Георгиевна , доктор технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заведующий кафедрой высшей математики и информатики (г. Старый Оскол)
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится «24» сентября 2021 года в 12⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.109.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» и ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «16» июля 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Белецкая
Светлана Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одним из перспективных направлений решения задач структурной, параметрической идентификации и синтеза сложных систем является окрестностное моделирование систем управления, основные принципы которого были изложены в работах С.Л. Блюмина, А.М. Шмырина, Н.Н. Карабутова, А.А. Томилина и других. Это направление, сформировавшееся в последние два десятилетия, объединяет классические разностные методы математической физики и теорию управления дискретными системами. Синтез окрестностной модели сложного производственного объекта или процесса основан, как правило, на системном анализе связей между составляющими его частями или узлами. Эти узлы и связи вместе с соответствующими переменными образуют окрестностную структуру модели – оснащённый орграф. Построенной окрестностной структуре производственного объекта или процесса сопоставляется окрестностная система – система уравнений, в которых переменные принадлежат окрестности вершины и самой вершине.

Следует отметить, что известным проблемным моментом при использовании метода окрестностного моделирования для описания достаточно сложных объектов, фактически оборотной стороной универсальности метода, является большое число параметров синтезируемой системы управления, подлежащих идентификации. Поэтому возникает задача получения достаточно значительного количества экспериментальных данных. В дополнение, большое количество параметров усложняет решение дальнейших задач оптимизации и управления. По этой причине актуальной является задача дополнительного (апостериорного) системного анализа построенной окрестностной модели, желательно до этапа параметрической идентификации, с целью уменьшения количества необходимых идентифицируемых параметров и, соответственно, уменьшения количества необходимой экспериментальной информации. Это возможно в тех случаях, когда изучаемый объект или процесс имеет некоторые важные свойства, не формализованные по тем или иным причинам в первичной окрестностной модели. В качестве таких обстоятельств можно рассмотреть вынужденное или преднамеренное упрощение первоначальной модели на этапе синтеза, получение новой информации о процессе уже после синтеза модели и т.д.

В данной работе разрабатывается метод апостериорного системного анализа окрестностных моделей для параллельных слабосвязанных процессов, реализованных в первичной модели в виде одной окрестностной системы над той же самой окрестностной структурой, без разделения общего процесса на составные части. Предлагаемый метод декомпозиции первичной окрестностной системы с последующим агрегированием, а также основанные на нем алгоритмы позволяют в случае параллельных слабосвязанных процессов упростить решение задач параметрической идентификации, оптимизации и управления. Описанные алгоритмы применяются в задаче управления микроклиматом производственного помещения на примере цеха обжига клинкера цементного завода.

При оценке **степени научной разработанности темы** можно выделить два

достаточно активно развивающихся в настоящее время направления: элементы системного анализа в окрестностном моделировании и исследование слабосвязанных систем, возникающих в различных областях прикладной математики и информационных технологий. Например, слабосвязанные системы нашли применение при решении задач функционального анализа, развитии и анализе архитектуры нейронных сетей, при проектировании web-сервисов. Концепция слабой связанности систем, как правило, применяется с целью сокращения количества зависимостей между элементами систем, подсистемами. В процессе функционирования систем возникает необходимость вносить изменения, поэтому меньшее количество связей сокращает объём возможных последствий этих изменений и из-за уменьшения количества связей задача разработки систем упрощается. Несмотря на то, что во многих работах раскрываются указанные выше направления научных исследований, задача синтеза в рамках окрестностных методов этих направлений с целью повышения их эффективности при решении задач разработки систем остаётся актуальной.

Целью работы является разработка методов системного анализа окрестностных моделей слабосвязанных процессов, основанных на декомпозиции общей окрестностной структуры двух параллельных процессов и позволяющих уменьшить количество идентифицируемых параметров модели и упростить решение задач оптимизации и управления.

Объект исследования. Параллельные слабосвязанные процессы и окрестностные модели таких процессов.

Предмет исследования. Системный анализ, декомпозиция и агрегирование окрестностных моделей слабосвязанных процессов.

Задачи исследования. В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

- осуществить анализ существующих окрестностных методов структурной и параметрической идентификации сложных систем, их анализа и синтеза;
- формализовать задачи системного анализа окрестностных моделей слабосвязанных параллельных процессов с общей окрестностной структурой;
- разработать алгоритмы декомпозиции и агрегирования для окрестностных моделей слабосвязанных процессов с целью редукции количества идентифицируемых параметров;
- разработать алгоритмы оптимизации и управления для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, основанных на декомпозиции этих моделей;
- разработать окрестностную систему управления микроклиматом производственного помещения на примере цеха обжига цементного клинкера с целью оптимизации энергопотребления и экологических характеристик технологического процесса.

Методы исследования основаны на использовании методов математического моделирования, системного анализа, окрестностного моделирования, теории графов, теории управления, теории вероятности и математической статистики, вычислительные эксперименты.

Тематика работы. Содержание диссертации соответствует специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

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

1. Разработана методика системного анализа окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов, отличающаяся введением классификации узлов и переменных модели по отношению к двум процессам и позволяющая формализовать структуру связей между параллельными процессами.

2. Разработан алгоритм структурного преобразования окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся использованием декомпозиции окрестностной структуры и позволяющий уменьшить количество идентифицируемых параметров модели.

3. Разработан алгоритм управления для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся частичным разделением переменных в соответствии с предшествующей декомпозицией модели и позволяющий уменьшить размерность задачи.

4. Разработан алгоритм приоритетной оптимизации функционала качества для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся возможностью выбора доминирующего процесса и позволяющий уменьшить размерность задачи оптимизации.

5. Разработана окрестностная система управления микроклиматом в цехе обжига цементного клинкера, отличающаяся разделением переменных по отношению к двум моделируемым процессам и позволяющая оптимизировать управление терморегулированием и аспирацией воздуха с точки зрения энергопотребления и экологических требований.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные методы системного анализа, декомпозиции и агрегирования окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов составляют теоретическую значимость результатов диссертации.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в построении с помощью разработанных методов системы управления микроклиматом производственного помещения (терморегулированием и аспирацией воздуха и применение этой модели для цеха обжига цементного клинкера цементного предприятия с целью оптимизации энергопотребления и улучшения экологических характеристик технологического процесса.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика системного анализа окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов, предполагающая введение классификации узлов и переменных по отношению к двум параллельным слабосвязанным процессам.

2. Алгоритм структурного преобразования окрестностных моделей для слабосвязанных процессов на основе предшествующего системного анализа и декомпозиции общей окрестностной структуры.

3. Алгоритм управления для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, основанный на частичном разделении переменных в соответствии с предшествующей декомпозицией модели.

4. Алгоритм приоритетной оптимизации функционала качества для окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов.

5. Окрестностная система управления микроклиматом производственного помещения, разработанная на примере цеха обжига цементного клинкера цементного предприятия, с целью оптимизации энергопотребления и экологических характеристик технологического процесса.

Реализация и внедрение результатов работы. Практические результаты диссертационной работы рекомендованы к использованию на АО «Липецк-цемент» для оптимального управления системой вентиляции, кондиционирования и фильтрации воздуха. Окрестностная система управления позволяет оптимизировать энергопотребление и уменьшить выбросы вредных веществ.

Теоретические результаты диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Апробация работы. Теоретические и практические результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и форумах: IX Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами», Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в образовании и науке», областной научной конференции «От учительского института к классическому университету», областного профильного семинара «Школа молодых учёных по проблемам гуманитарных, естественных и технических наук», IX, X Международной научно-практической интернет-конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК, международной математической школы «Понрягинские чтения – XXXII», а также на научных семинарах кафедры высшей математики ФБГОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Исследование проводилось в рамках инициативного научного проекта, поддержанного грантом РФФИ «Создание информационно-аналитической технологии моделирования и управления распределёнными техническими системами на основе динамических билинейных окрестностных моделей», проект № 16-07-00854 а (2017-2018 г).

Публикации. Основные результаты исследования изложены в 19 опубликованных научных работах, в том числе 4 – единолично. Из них 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных в Перечне ВАК, 3 – в изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и Web of Science, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат: [2, 10] – разработка окрестностной структуры системы вентиляции кондиционирования воздуха в цехе обжига клинкера; [3, 9, 11] – математическая модель микроклимата в цехе обжига клинкера; [4] – разработка классификации переменных окрестностной модели, структурная идентификация модели системы вентиляции цеха обжига цементного клинкера, алгоритм декомпозиции окрестностных моделей; [5] – алгоритм управления для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, алгоритм приоритетной оптимизации функционала качества для окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов; [6] – алгоритм поиска квазиоптимального режима для двойной системы, состоящей из двух слабосвязанных подсистем, схема системного анализа окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов, алгоритм разделения окрестностной

структуры двойной системы; [7, 8] – алгоритмическое обеспечение окрестностных систем; [9] – модели слабосвязанных окрестностных структур; [11, 13, 15, 18] – математические модели процессов вентиляции и кондиционирования воздуха, [12, 14, 18] – разработка алгоритма оптимизации системы управления системой вентиляции и кондиционирования.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть работы изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор теории окрестностных систем и связанных с ними методов системного анализа, среди которых для данного исследования наиболее важными являются методы декомпозиции и агрегирования. В контексте окрестностных систем рассматриваются задачи структурной и параметрической идентификации, системного анализа. Указываются проблемные моменты окрестностных методов, связанные с необходимостью идентификации большого количества коэффициентов модели. Обсуждаются понятие слабосвязанных систем и имеющиеся в литературе результаты, относящиеся к исследованию слабосвязанных систем. Приводится и анализируется пример слабосвязанных систем, возникающий в задаче управления микроклиматом производственного помещения.

Во второй главе разработаны методы системного анализа окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов. Предполагается, что некоторый моделируемый процесс является «двойным» в том смысле, что он может рассматриваться как два частично зависимых процесса. При этом первоначальная (априорная) окрестностная модель в целях предварительного упрощения или по каким-либо другим причинам, например, из-за отсутствия достаточной информации, была построена без анализа возможности разделения исходного двойного процесса на две составные части. Рассматривается задача апостериорного системного анализа построенной окрестностной модели с целью разделения переменных по отношению к двум процессам, последующей декомпозиции окрестностной структуры модели и дальнейшего агрегирования двух новых окрестностных структур с учётом наличия общих узлов, переменных и связей. Обсуждаются задачи идентификации, управления и оптимизации для полученной апостериорной окрестностной модели, учитывающей разделение исходного двойного процесса на два параллельных слабосвязанных процесса.

Под окрестностной структурой понимается орграф с наборами переменных в вершинах. Окрестность вершины определяется как множество всех её прямых предшественников. Окрестностная модель – это система уравнений, соответствующих вершинам окрестностной структуры, при этом переменные в уравнении принадлежат окрестности вершины и самой вершине [1, 6]. Этапу структурной идентификации соответствует определение переменных, входящих в уравне-

ния. Затем выбирается тип уравнений и находятся неизвестные коэффициенты – этап параметрической идентификации. Достоинством применения окрестностного моделирования является устранение трудной задачи структурной идентификации из-за наличия большого числа параметров.

Для надежной идентификации параметров уравнений требуется большое количество экспериментальных данных. Уравнения окрестностной системы, описанные в [2], в линейном случае включают 98 параметров. Поэтому использование любой существующей информации, которая связана со структурой уравнений или с их физическим смыслом, позволит уменьшить количество идентифицируемых параметров.

Одним из способов, позволяющих в некоторых случаях улучшить ситуацию, является дальнейший апостериорный системный анализ окрестностной модели с целью её детализации на уровне окрестностной структуры. Такая детализация эффективна, например, в случае, когда производственный процесс представляет собой два или более отдельных процесса, моделируемых той же самой окрестностной структурой, но разными переменными узлов, при этом некоторые из этих переменных являются общими для всех или нескольких процессов.

Две окрестностные системы S_1 и S_2 называются *параллельными*, если они заданы над одной окрестностной структурой. Переменная состояния, входа или выхода называется *локальной* в случае двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$, если она используется только в S_1 или S_2 . *Глобальной* называется переменная состояния, входа или выхода, если она используется в S_1 и S_2 .

Система $S = \{S_1, S_2\}$ называется двойной, где S_1, S_2 – параллельные подсистемы. Классификация связей параллельных подсистем S_1 и S_2 приведена в таблице 1.

Таблица 1

Тип связи	Характеристика
по входам (управлениям)	имеется хотя бы одна глобальная переменная входа (управления)
по состояниям	имеется хотя бы одна глобальная переменная состояния
по выходам	имеется хотя бы одна глобальная переменная выхода
по (глобальному) критерию оптимальности	есть критерий оптимальности и он является глобальным, то есть содержит переменные и первой и второй системы

Параллельные системы S_1 и S_2 мы называем *слабосвязанными*, если количество глобальных переменных можно считать малым по смыслу рассматриваемой задачи: $s_{12} \ll s_1 + s_2$, s_{12} – количество глобальных переменных, s_i – количество локальных переменных i -подсистемы, $i=1,2$.

Для двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$ вершина x окрестностной структуры (вход u , узел v или выход w) называется:

локальной вершиной или S_i -*локальной* вершиной, если все её переменные являются S_i -локальными;

сепарабельной вершиной или $S_1 S_2$ -вершиной, если все её переменные яв-

ляются локальными и среди них есть и S_1 -локальные и S_2 -локальные;
несепарабельной вершиной, или S_{12} -вершиной, если все её переменные являются глобальными;

полусепарабельной вершиной, если среди её переменных есть и локальные, и глобальные.

Алгоритм расщепления окрестностной структуры двойной системы:

1. Каждая сепарабельная вершина расщепляется, вместе со своими переменными, на две локальные, при этом все инцидентные рёбра дублируются.

2. Каждая полусепарабельная вершина расщепляется, вместе со своими переменными, на одну несепарабельную и одну или две локальные вершины, в зависимости от типа полусепарабельности (S_1S_{12} , S_2S_{12} или $S_1S_2S_{12}$), при этом все инцидентные рёбра дублируются.

3. Рассматриваются две копии полученной окрестностной структуры, при этом из первой (соответственно второй) копии удаляются все S_2 -локальные (соответственно S_1 -локальные) вершины и все инцидентные этим вершинам рёбра.

4. Две полученные окрестностные структуры склеиваются по соответствующим (идентичным) глобальным вершинам и инцидентным этим вершинам рёбрам.

В результате расщепления окрестностной структуры вдвое уменьшается количество параметров, подлежащих идентификации и, кроме того, упрощаются задачи управления и оптимизации для полученной апостериорной окрестностной модели, учитывающей разделение исходного двойного процесса на два параллельных слабосвязанных процесса.

Структурная идентификация системы, описывающей два слабосвязанных процесса, включает в себя задачу декомпозиции: система S представляется в виде двух слабосвязанных систем S_1 и S_2 . Основная цель этапа – упрощение системы S на абстрактном уровне. На этом этапе мы фактически имеем дело не с системами уравнений, а с окрестностной структурой процесса и пытаемся разделить процесс, моделируемый этой структурой, на два слабосвязанных. В частности, на этом этапе нужно разделить все переменные на локальные и глобальные. Это наиболее трудная и, как правило, не формализуемая часть задачи, даже в тех случаях, когда наличие параллельных процессов не вызывает сомнений.

Задача оптимизации для двойных систем

В общем виде задачу поиска оптимального (стационарного) режима системы S можно поставить следующим образом. Пусть X^1 , X^2 , U^1 и U^2 – локальные переменные состояний и управлений систем S_1 и S_2 и пусть X^3 , U^3 – глобальные (общие) переменные состояний и управлений.

Задача условной оптимизации для поиска оптимального режима S :

$$\begin{aligned} K_1(X_1, U_1, X_3, U_3) + K_2(X_2, U_2, X_3, U_3) &\rightarrow \min \\ \begin{cases} F_2(X_2, U_2, X_3, U_3) = 0, \\ F_1(X_1, U_1, X_3, U_3) = 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где в статическом случае двойная система S имеет вид

$$\begin{cases} F_1(X_1, U_1, X_3, U_3) = 0, \\ F_2(X_2, U_2, X_3, U_3) = 0, \end{cases}$$

а критерий оптимальности в большинстве практически важных случаев аддитивен

$$K(X_1, U_1, X_2, U_2, X_3, U_3) = K_1(X_1, U_1, X_3, U_3) + K_2(X_2, U_2, X_3, U_3) \rightarrow \min,$$

где K_1, K_2 – некоторые функции.

Для параллельных систем, связанных только глобальным критерием оптимальности, задача (1) распадается на две независимые задачи

$$\begin{cases} K_1(X_1, U_1) \rightarrow \min, \\ F_1(X_1, U_1) = 0. \end{cases} \quad \begin{cases} K_2(X_2, U_2) \rightarrow \min, \\ F_2(X_2, U_2) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм приоритетной оптимизации

Если задача оптимизации одной из двух систем S_1 и S_2 , например, системы S_1 , имеет приоритет, то общую задачу оптимизации двойной системы S с аддитивным критерием оптимальности можно решать следующим образом.

1. Находится решение $(X_1^*, U_1^*, X_3^*, U_3^*)$ задачи

$$\begin{cases} K_1(X_1, U_1, X_3, U_3) \rightarrow \min \\ F_1(X_1, U_1, X_3, U_3) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

2. Решается задача

$$\begin{cases} K_2(X_2, U_2, X_3^*, U_3^*) \rightarrow \min \\ F_2(X_2, U_2, X_3^*, U_3^*) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Алгоритм оценки минимума

Следующий алгоритм можно назвать алгоритмом квазиоптимизации (приближённого решения) задачи (1) для слабосвязанных систем S_1 и S_2 , поскольку в общем случае он не находит минимум, но позволяет получить некоторую оценку сверху.

1. Поиск решения задач минимизации

$$K_1(X_1, U_1, X_3, U_3) \rightarrow \min. \quad \text{и} \quad K_2(X_2, U_2, X_3, U_3) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Пусть $(X_1^*, U_1^*, X_3^{*1}, U_3^{*1})$ и $(X_2^*, U_2^*, X_3^{*2}, U_3^{*2})$ – найденные значения переменных.

2. Поиск решения (X_3^*, U_3^*) одной задачи минимизации по (X_3, U_3)

$$K(X_1^*, U_1^*, X_2^*, U_2^*, X_3, U_3) = K_1(X_1^*, U_1^*, X_3, U_3) + K_2(X_2^*, U_2^*, X_3, U_3) \rightarrow \min \quad (6)$$

на отрезке $[(X_3^{*1}, U_3^{*1}), (X_3^{*2}, U_3^{*2})]$.

Оба алгоритма (алгоритм приоритетной оптимизации и оценки минимума) можно использовать при любом количестве общих переменных двух систем, однако наиболее эффективны они в случае, когда общих переменных достаточно мало, то есть системы S_1, S_2 слабо связаны.

Алгоритм решения задачи стабилизации вблизи номинального режима

Разложим функции F_1 и F_2 в окрестности номинального режима

$(X_1^0, U_1^0, X_2^0, U_2^0, X_3^0, U_3^0)$ в ряды Тейлора и ограничимся линейными частями, получим систему относительно приращений $(\Delta X_1, \Delta U_1, \Delta X_2, \Delta U_2, \Delta X_3, \Delta U_3)$:

$$\begin{cases} A_{11}\Delta X_1 + A_{13}\Delta X_3 + B_{11}\Delta U_1 + B_{13}\Delta U_3 = 0, \\ A_{22}\Delta X_2 + A_{23}\Delta X_3 + B_{22}\Delta U_2 + B_{23}\Delta U_3 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Корректирующие управления $\Delta U = (\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3)$ для компенсации отклонений $\Delta X = (\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3)$ состояний системы S от номинальных являются решением системы

$$\begin{cases} B_{11}\Delta U_1 + B_{13}\Delta U_3 = -(A_{11}\Delta X_1 + A_{13}\Delta X_3) = C_1, \\ B_{22}\Delta U_2 + B_{23}\Delta U_3 = -(A_{22}\Delta X_2 + A_{23}\Delta X_3) = C_2. \end{cases} \quad (8)$$

Матрица системы (2):

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} \\ 0 & B_{22} & B_{23} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Минимальное по норме решение:

$$\Delta U_* = B^+ [C_1, C_2]^T, \quad (10)$$

где B^+ – псевдообратная матрица.

В третьей главе разработана и проанализирована методом, описанным во второй главе, окрестностная модель управления микроклиматом производственного помещения. В предлагаемой модели рассматриваются две характеристики микроклимата: температура и концентрация пыли. В работе рассматривается статический случай, описывающий установившийся режим и установившиеся значения всех переменных.

На данном этапе системного анализа рассмотрим окрестностную структуру системы управления производственной вентиляцией, кондиционированием и фильтрацией воздуха в помещении, в воздух рабочей зоны которого могут выделяться вредные вещества. Причиной выделения этих веществ может быть технологический процесс, оборудование, а также несовершенство или несоблюдение технологий производства.

Окрестностная структура [1, 2, 4] системы вентиляции, кондиционирования, фильтрации воздуха цеха обжига цементного предприятия изображена на рисунке 1 и включает четыре вершины:

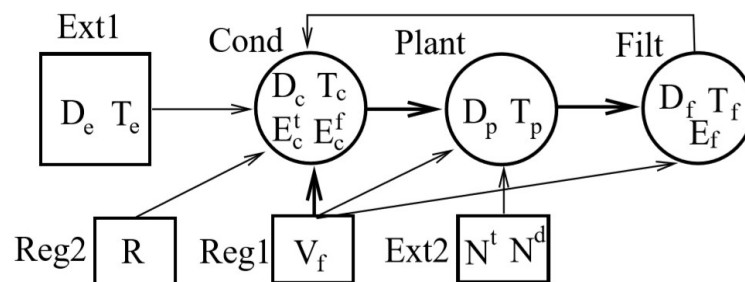


Рисунок 1 – Окрестностная структура системы вентиляции и фильтрации

На рисунке 1 внутри узлов перечислены переменные, нижние индексы ко-

торых обозначены по первой букве имени узла: e (Ext1 – поступление наружного воздуха в приточную вентиляцию), c (Cond – терморегуляция и фильтрация приточного воздуха), p (Plant – теплоступление и пылеобразование в производственном цехе), f (Filt – вытяжка и фильтрация воздуха перед рециркуляцией и удалением), верхний индекс t соответствует температуре, d – пыли, f – приточной вентиляции и фильтрации воздуха. Ориентированные рёбра (стрелки) соответствуют материальным потокам (воздух) и информации. Вершины Reg1, Reg2 – регулируемые входы, так как переменные («управления»), находящиеся в них, могут менять значение «поворотом регулятора», Ext2 – нерегулируемый вход в рамках рассматриваемой системы, но в глобальной модели производства – регулируемый вход.

Окрестностная структура (рис. 1) в базовом случае включает следующие переменные (табл. 2):

Таблица 2

Переменные узлов окрестностной структуры

Вершина	Тип	Переменные
Ext1	Вход	D_e – концентрация пыли в приточном воздухе, T_e – температура приточного воздуха.
Cond	Узел	D_c – концентрация пыли после фильтрации, T_c – температура воздуха, E_c^f – расход энергии в единицу времени на фильтрацию, E_c^t – расход энергии в единицу времени на кондиционирование воздуха.
Plant	Узел	T_p – установившаяся температура в цехе, D_p – установившаяся концентрация пыли в цехе.
Filt	Узел	D_f – концентрация пыли после фильтрации, T_f – температура воздуха после фильтрации, E_f – расход энергии в единицу времени на вытяжку и фильтрацию.
Ext2	Вход	N^t – интенсивность тепловыделения (глобальная переменная), N^d – интенсивность пылеобразования (глобальная переменная).
Reg1, Reg2	Вход	V_f – объем кондиционируемого воздуха в единицу времени (глобальная переменная), R – коэффициент рециркуляции (глобальная переменная).
Exit	Выход	D_f – концентрация пыли после фильтрации, T_f – температура воздуха после фильтрации.

Декомпозиция окрестностной структуры системы управления производственной вентиляцией, кондиционированием и фильтрацией воздуха представлена на рисунке 2. Критерий оптимальности для системы вентиляции, кондиционирования и фильтрации имеет вид

$$E = E_f + E_c^t + E_c^f \rightarrow \min.$$

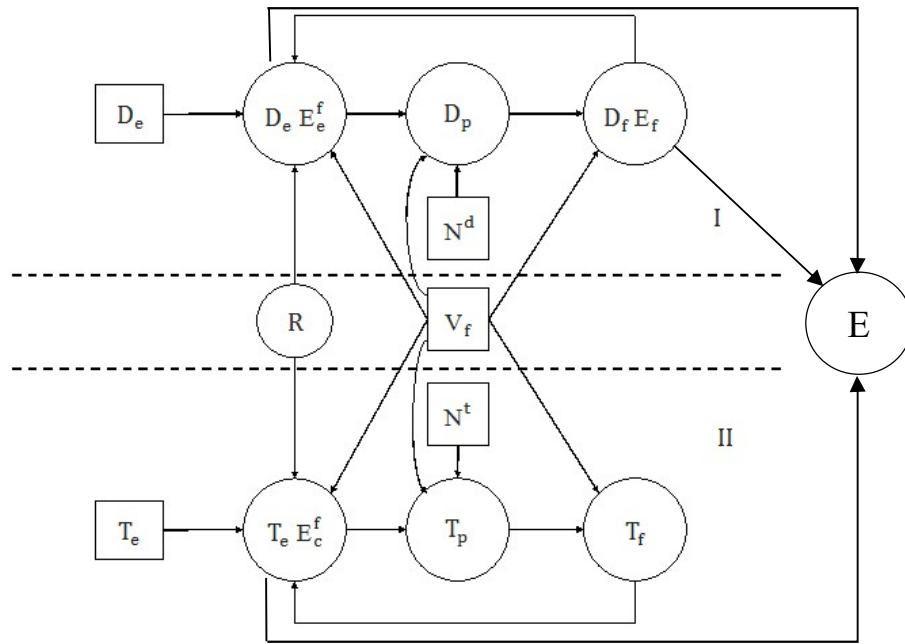


Рисунок 2 – Окрестностная структура слабосвязанных систем вентиляции и фильтрации

Модель окрестностной системы S до декомпозиции на две параллельные системы:

$$\begin{cases}
 D_c = F_{cd}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\
 T_c = F_{ct}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\
 E_c^f = F_{cef}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\
 E_c^t = F_{cet}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\
 D_p = F_{pd}(D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, D_p, T_p, V_f, N^d, N^t) \\
 T_p = F_{pt}(D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, D_p, T_p, V_f, D_f, N^d, N^t) \\
 D_f = F_{fd}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\
 T_f = F_{ft}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\
 E_f = F_{ff}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f)
 \end{cases} \quad (11)$$

Эта система в простейшем линейном случае содержит не менее восьмидесяти параметров. После декомпозиции получаем две слабосвязанных подсистемы по управлению V_f и R :

$$\begin{cases}
 D_c = F_{cd}(D_e, D_c, E_c^f, E_f, V_f, D_f, R) \\
 E_c^f = F_{cef}(D_e, D_c, E_c^f, E_f, V_f, D_f, R) \\
 D_p = F_{pd}(D_c, E_c^f, D_p, V_f, N^d) \\
 D_f = F_{fd}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\
 E_f = F_{ff}(D_p, V_f, E_f, D_f)
 \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases}
 T_c = F_{ct}(T_e, T_c, E_c^t, V_f, T_f, R) \\
 E_c^t = F_{cet}(T_e, T_c, E_c^t, V_f, T_f, R) \\
 T_p = F_{pt}(T_c, E_c^t, T_p, V_f, N^t) \\
 T_f = F_{ft}(T_p, V_f, T_f)
 \end{cases} \quad (12)$$

Линейная реализация систем (12) содержит около 30 коэффициентов, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации. Использование физических соображений позволило дополнительно сократить количество уравнений в системах (12) и конкретизировать трilinearную аналитическую модель, в которой количество идентифицируемых параметров уменьшилось до 9.

В зависимости от рассматриваемой задачи определяется тип переменной:

состояние или управление, внешняя переменная или внутренняя. В данном исследовании сначала определим переменные управления – E_c^f , E_c^t , E_f , V_f и R , оставшиеся переменные будут состояниями. В окрестностной модели системы управления микроклимата T_e , D_e , N^t , N^d определены как внешние переменные, а все остальные переменные – внутренние.

Оптимизация производственных процессов зависит от корректного выбора технологических ограничений, определяющих область существования оптимальных решений. В рассматриваемой модели (11) внутренние переменные (состояния и управления) должны удовлетворять следующим ограничениям

$$\begin{aligned} T_c &\in [T_c^{\min}, T_c^{\max}], T_p \in [T_p^{\min}, T_p^{\max}], \\ D_c &\leq D_c^{\max}, D_p \leq D_p^{\max}, D_f \leq D_f^{\max}, \\ E_c^f &\leq E_c^{f\max}, E_c^t \leq E_c^{t\max}, E_f \leq E_f^{\max}. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение связи объёмов приточного воздуха V_c и удаляемого воздуха V_f :

$$V_c + RV_f = V_f \text{ или } V_c = (1 - R)V_f. \quad (14)$$

Уравнение связи приточного и удаляемого воздуха (14) в более подробной записи учитывает дополнительную утечку воздуха $V_c = (1 - R)V_f + V_{ext}$. Используя уравнение (14), можно исключить переменную V_c из систем (12).

Пользуясь физическими соображениями, описывающими расход электроэнергии, пылеобразование, тепловой баланс, запишем уравнения для фильтрации терморегуляции, введем вспомогательную функцию $S(x) = \max(0, x)$.

Уравнения для фильтрации пыли

Рассмотрим модель, характеризующую работу системы вентиляции и кондиционирования воздуха в режиме фильтрации (фильтрация приточного воздуха, фильтрация удаляемого воздуха). Данная модель описывается следующими уравнениями при интенсивности пылеобразования N^d :

$$\begin{cases} E_c^f = \beta_c^f V_f + \beta_c^d [V_c S(D_e - D_c) + RV_f S(D_f - D_c)]; \\ D_p = \hat{D}_c + \beta_p^d N^d - \beta_p^f V_f; \\ E_f = \beta_f^d V_f (D_p - D_f) + \beta_f^f V_f. \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{где } \hat{D}_c = (1 - R) \min\{D_c, D_e\} + R \min\{D_c, D_f\}, \quad (16)$$

описывает концентрацию пыли после фильтрации в смеси приточного и возвращаемого рециркуляцией воздуха до уровня концентрации пыли D_c .

Первое уравнение системы (15) является кусочно-трилинейным и отражает величину расхода электроэнергии на фильтрацию воздуха E_c^f , поступающего после рекуперации (поток приточного и возвращаемого воздуха) в приточную вентиляцию (вершина «Cond»). Второе уравнение является линейным и отражает содержание количества клинкерной пыли D_p в производственном помещении (вершина «Plant»). Третье уравнение является кусочно-билинейным и отражает величину расхода электроэнергии E_f на вытяжную вентиляцию и фильтрацию воздуха (вершина «Filt»). На этапе параметрической идентификации должны

быть найдены коэффициенты $\beta_p^d, \beta_p^f, \beta_f^d, \beta_f^f, \beta_c^f, \beta_c^d$.

Уравнения для терморегуляции

Рассмотрим третью модель, характеризующую работу системы вентиляции и кондиционирования воздуха в режиме терморегулирования. Данная модель описывается следующими уравнениями при интенсивности тепловыделения N^t :

$$\begin{cases} E_c^t = \gamma_c^f |(V_c(T_e - T_c) + RV_f(T_p - T_c))|; \\ T_p = T_c + \gamma_p^t N^t - \gamma_p^f V_f. \end{cases} \quad (17)$$

Первое уравнение системы (17) является линейным и описывает тепловой баланс в производственном помещении (вершина «Plant»). Второе уравнение является кусочно-трилинейным и отражает расход электроэнергии на регулирование температуры воздуха, подаваемого в производственное помещение и состоящего из потоков приточного и циркуляционного воздуха (вершина «Cond»). Коэффициенты γ_p^t , γ_p^f и γ_c^f неизвестны и определены с помощью регрессионного анализа (этап параметрической идентификации).

Системы уравнений (15, 17) содержат только девять коэффициентов, которые необходимо найти на этапе параметрической идентификации [1, 6]. Заметим, что интенсивности пылеобразования N^d и тепlopоступлений N^t часто линейно зависят от интенсивности производства N , и в этом случае переменные N^d и N^t можно заменить на N .

Задача минимизации энергопотребления для систем вентиляции и фильтрации

Окрестностное моделирование процессов воздухообмена направлено на оптимизацию энергопотребления и экологических характеристик технологического процесса [2, 3]. Необходимо минимизировать затраты электроэнергии при технологических ограничениях (13), определяющих область существования оптимальных решений

$$E = E_f + E_c^t + E_c^f \rightarrow \min. \quad (18)$$

Наряду с этим, производственные процессы зачастую оказывают негативное воздействие на окружающую среду, выделяя в атмосферный воздух пыль и другие органические соединения. Поэтому важной является проблема минимизации «экологического» функционала

$$E^{\circ}(k) = (1-k) \left(\frac{E}{E_n} \right)^2 + k \left(\frac{(1-R)V_f D_f}{D_v^n} \right)^2 = (1-k) \left(\frac{E}{E_n} \right)^2 + k \left(\frac{D_f}{D_f^n} \right)^2, \quad (19)$$

где E_n – номинальное значение потребления энергии, D_f^n – номинальная интенсивность выделения пыли и $k \in [0; 1]$ – выбираемый коэффициент.

Таким образом, модель можно рассматривать как базовую для дальнейших уточнений и дополнений, связанных с конкретным типом производства.

В четвертой главе разработанные в предыдущих главах методы и модель применяются в задаче управления микроклиматом в цехе обжига цементного клинкера цементного предприятия. На основании экспериментальных данных АО «Липецкцемент» методом наименьших квадратов находятся коэффициенты уравнений общей модели фильтрации и терморегулирования с учётом сезона.

Параметрически идентифицированная модель фильтрации с коэффициентами, соответствующими зимнему сезону:

$$\begin{cases} E_c^f = 0.222V_f + 0.183(V_c S(D_e - D_c) + RV_f S(D_f - D_c)), \\ D_p = \hat{D}_c + 0,1554N^d - 0.0001V_f, \\ E_f = 0.046V_f(D_p - D_f) + 0.003V_f. \end{cases} \quad (20)$$

Параметрически идентифицированная модель терморегуляции с коэффициентами, соответствующими зимнему сезону:

$$\begin{cases} E_c^t = 26.6863V_f|(1-R)(T_e - T_c)| + R(T_p - T_c), \\ T_p = T_c + 5.3129N - 0.0004V_f. \end{cases} \quad (21)$$

График фактического и расчетного (по построенной модели) значений расхода энергии на фильтрацию и кондиционирование воздуха E_c^f для зимнего сезона изображен на рисунке 3.

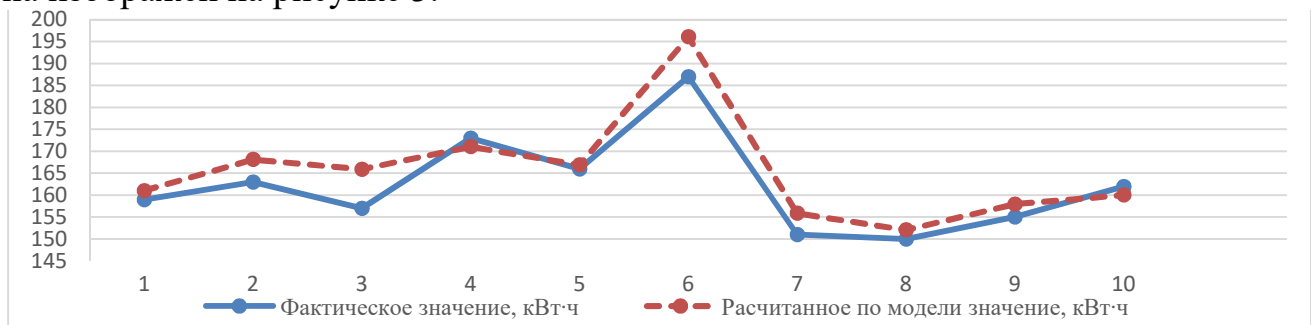


Рисунок 3 – Фактические и рассчитанные по модели расходы энергии E_c^f в зимний период

Средняя ошибка аппроксимации приведена в таблице 2.

Таблица 2

Сезон	Средняя ошибка аппроксимации, %				
	E_f	D_p	E_c^f	T_p	E_c^t
Зимний	2,325	1,748	2,168	1,861	2,05
Весенний	1,818	1,442	2,257	1,851	1,958
Летний	2,157	1,573	1,766	1,914	1,992
Осенний	1,791	1,586	1,942	1,219	2,054

Средняя ошибка аппроксимации не превышает 3% и говорит о хорошем качестве окрестностных моделей, также удовлетворяет предъявляемым на цементном производстве требованиям. Проверяется адекватность построенных сезонных моделей посредством сравнения расчётных модельных и экспериментальных значений. Наибольшее значение скорректированного коэффициента множественной детерминации наблюдается в осенний период, что может быть обусловлено погодными условиями конкретного периода, а именно: отсутствием резких колебаний внешних температур.

Решена задача минимизации потребления энергии с использованием идентифицированных сезонных моделей градиентными численными методами.

Расчитанное оптимальное энергопотребление приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сезон	Фактическое значение, кВт·ч	Рассчитанное значение, кВт·ч	Процент экономии электроэнергии, %			
	E	E	E	E_f	E_c^f	E_c^t
Зимний	10815264	10492860	2,981	3,671	5,146	3,015
Весенний	886959	858612	3,196	4,449	4,489	3,590
Летний	9189215	8938257	2,731	4,945	4,852	3,251
Осенний	861484	834614	3,119	4,596	4,146	3,146

График оптимального и фактического энергопотребления (Квт·ч) для 100 выбранных временных промежутков приведен на рисунке 4.

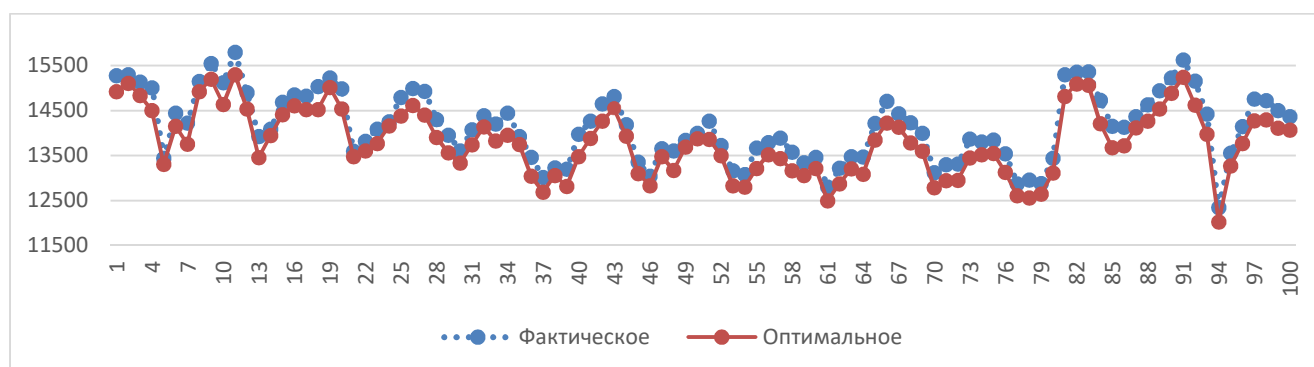


Рисунок 4 – Сравнение оптимального и фактического энергопотребления

Разработанный алгоритм управления обеспечивает энергосберегающий режим работы системы управления микроклимата. На величину расхода электроэнергии большое влияние оказывает климатологический фактор, в средней полосе в течение продолжительного времени наблюдаются устойчивые отрицательные температуры, поэтому нагрузка на систему кондиционирования воздуха возрастает в этот период. Система вентиляции и кондиционирования воздуха включает рекуперацию, это позволяет минимизировать потребление энергии, но требует дополнительной фильтрации возвращаемого воздуха.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках работы были получены следующие результаты:

1. Разработана методика системного анализа окрестностных моделей параллельных слабосвязанных процессов, отличающаяся введением классификации узлов и переменных модели по отношению к двум процессам и позволяющая формализовать структуру связей между параллельными процессами;
2. Разработан алгоритм структурного преобразования окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся использованием декомпозиции окрестностной структуры и позволяющий уменьшить количество идентифицируемых параметров модели;
3. Разработан алгоритм управления для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся частичным разделением переменных в соответствии с предшествующей декомпозицией модели и позволяющий уменьшить

размерность задачи;

4. Разработан алгоритм приоритетной оптимизации функционала качества для окрестностных моделей слабосвязанных процессов, отличающийся возможностью выбора доминирующего процесса и позволяющий уменьшить размерность задачи оптимизации;

5. Разработана окрестностная система управления микроклиматом в цехе обжига цементного клинкера цементного предприятия, отличающаяся разделением переменных по отношению к двум моделируемым процессам и позволяющая оптимизировать управление терморегулированием и аспирацией воздуха с точки зрения энергопотребления и экологических требований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Сёмина, В.В. Идентификация слабосвязанных окрестностных систем / В.В. Сёмина // Вестник ВГТУ. – 2019. – № 2. – С. 69-75.
2. Сёмина, В.В. Структурное окрестностное моделирование систем промышленной вентиляции / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, О.А. Мещерякова, Е.А. Лукьянова // Таврический вестник информатики и математики. – 2017. – № 4(37). – С. 96-105.
3. Сёмина, В.В. Моделирование производственных систем вентиляции / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, О.А. Мещерякова, С.Л. Подвальный // Вестник ВГТУ. – 2017. – № 6. – С. 13-18.

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

4. Semina, V.V. Structural Identification of Neighborhood Model for Ventilation-Filtration System / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – Volume 12, Number 21 (2017). – pp. 11114-11117.
5. Semina, V.V. Neighborhood model for the ventilation system in the industrial premises / Anatoliy Shmyrin, Valery Kavygin and Valeria Semina // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – Volume 12, Number 16 (2017). – pp. 6230-6234.
6. Semina, V.V. Weakly Connected Neighborhood Systems / Anatoliy Shmyrin, Nikolay Mishachev and Valeria Semina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia, 2019. – pp. 1-6.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. Сёмина, В.В. Агрегированное псевдорешение набора линейных систем несколькими общими переменными / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, Е.П. Трофимов, А.С. Канюгина // М.: ФГБУ ФИПС, 2017. Госрегистрация №2017661543 от 26.06.2017.
8. Сёмина, В.В. Моделирование окрестностных систем на графах / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, Е.П. Трофимов, Е.А. Лукьянова // М.: ФГБУ ФИПС, 2018. Госрегистрация №2018617844 от 13.10.2018.

Статьи и материалы конференций

9. Сёмина, В.В. Параметрическая идентификация окрестностной модели процесса воздухообмена в производственном помещении / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, Е.П. Трофимов // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2017. – № 3, Т. 23. – С. 463-469.
10. Сёмина, В.В. Агрегирование окрестностных систем в модели вентиляции цеха цементного производства / В.В. Сёмина, А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев // Вестник Там-

бовского государственного университета. – 2017. – Т. 22, вып. 6. – С. 1346-1354.

11. Правильникова (Сёмина), В.В. Моделирование микроклимата в производственном помещении / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин // Научно-технический журнал «Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации». – 2016. – № 1 (35). – С. 117-120.

12. Правильникова, В.В. Прогнозирование ресурсопотребления для управления микроклиматом в помещении плавательного бассейна / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин // Вестник Липецкого государственного технического университета (Вестник ЛГТУ). – 2015. – № 2(24). – С. 36-40.

13. Правильникова, В.В. Математическое моделирование микроклимата в помещении плавательного бассейна системами дифференциальных уравнений / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин // Научно-технический журнал «Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации». – 2015. – № 1-2 (34-35). – С. 196-200.

14. Правильникова, В.В. Система управления микроклиматом здания с прогнозированием ресурсопотребления / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин // Научно-технический журнал «Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации». – 2014. – № 1-2 (32-33). – С. 198-203.

15. Правильникова, В.В. Применение математического моделирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении плавательного бассейна / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин // Научно-технический журнал «Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации». – 2013. – № 1-2 (30-31). – С. 108-111.

16. Правильникова, В.В. Применение интеллектуального анализа данных для оптимизации энергопотребления здания / В.В. Правильникова // Современные тенденции в образовании и науке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 декабря 2012 г.: в 10 частях. Часть 6; М-во обр. и науки РФ. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 110-111.

17. Правильникова, В.В. Оптимизация системы управления обменом и кондиционированием воздуха плавательного бассейна / В.В. Правильникова // Управление большими системами: материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 2 / Липецкий государственный технический университет. – Тамбов-Липецк: Изд-во Першина Р.В., 2012. – С. 228-230.

18. Правильникова, В.В. Автоматизированная система управления вентиляцией в помещении плавательного бассейна / В.В. Правильникова, С.Л. Блюмин, П.В. Сараев, А.К. Погодаев // Сборник материалов X Международной научно-практической интернет-конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК ", 15 марта – 30 июня 2012. - Орел: ОрГТУ, 2012. – С. 16-19.

19. Правильникова, В.В. Оптимальное управление энергопотреблением в системах вентиляции плавательных бассейнов / В.В. Правильникова // Научно-технический журнал «Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации». – 2012. – № 2 (29). – С. 262-266.

Подписано в печать 02.07.2021. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 415.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.

398055, Липецк, ул. Московская, 30.