

ОТЗЫВ

официального оппонента Петушкова Михаила Юрьевича
на диссертационную работу Ибряевой Ольги Леонидовны на тему:
«Методы и алгоритмы экспоненциального анализа для промышленных
приложений в АСУ ТП», представленную соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ,
управление и обработка информации, статистика

1. Актуальность диссертационного исследования

Несмотря на более чем двухсотлетнюю историю задача экспоненциального анализа, ее применения, ограничения и проблемы актуальны и сегодня. За это время разработано множество методов решения задачи, но наибольшую популярность и эффективность демонстрируют Прони-подобные методы: метод Паде – Лапласа, Прони и метод матричных пучков. Основными проблемами этих методов являются вопросы определения числа экспонент, выбор оптимальной частоты дискретизации сигнала и уменьшение вычислительных затрат, определение параметров потока случайно возникающих затухающих синусоид, когда полезный сигнал существует не всегда и время его начала не известно. Для реальных промышленных приложений, задача экспоненциального анализа не предполагает оценки параметров конкретных экспонент ввиду бесконечного числа составляющих, сложности спектра, сложностей со сбором данных и т.д. Как правило, в таких задачах нам нужно отслеживать состояние механизма, определять зарождение неисправности и ее тип. Это задачи для проактивной диагностики, а для того, чтобы отследить изменения в спектральном составе сигнала при зарождении неисправности, чаще всего применяется подход на основе предварительного выделения информативных признаков из сигнала и/или его спектра и для определения класса дефекта. В связи с этим актуальной для таких промышленных задач является разработка алгоритмов выделения информативных признаков, характеризующих состояние объекта.

В связи с выше изложенным, в диссертации соискателем делается правильный вывод о том, что необходимы *новые методы* экспоненциального анализа и *новые алгоритмы* обработки информации для промышленных приложений, а решение данных задач имеет *важное научное и практическое значение*.

II. Научная новизна и основные результаты исследований

К основным научным результатам, определяющим новизну и значимость представленной диссертационной работы можно отнести следующие:

1. Разработан новый алгоритм обработки информации, повышающий точность измерений для промышленного применения (кориолисового расходомера), основанный на вычислении аппроксимаций Паде со знаменателем минимальной степени, не дающий ложных полюсов, вызванных неединственностью знаменателя аппроксимации, а также новый метод вычисления коэффициентов Тейлора, основанный на замене сигнала его сглаживающим сплайном, а также получена модификация метода Паде-Лапласа. Интерполирование сплайном позволяет уменьшить шум и вычислить интегралы явно, устраняя ошибку численного интегрирования.

При исследовании расходомера ЭлМетро ДУ15 у, которого расход меняется в районе 1000-2000 кг/ч, в моменты появления воздуха наблюдаются уменьшение амплитуды сигнала. Предложенный соискателем алгоритм обеспечивает технический эффект за счет способности оперативно детектировать резкие изменения сигнала при появлении воздуха и повышает точность оценок параметров сигналов в двухфазной среде, что в итоге улучшает точность определения расхода и плотности.

2. Для задач технической диагностики при определении состоянии компонентов АСУ ТП впервые получена оценка числа обусловленности матрицы в методе Прони, разработан новый алгоритм определения частоты дискретизации сигнала, дающей минимальное значение этой оценки и наименьшее усиление шума.

Впервые получена оценка чисел обусловленности матриц в методе Прони. Для уменьшения этих оценок необходимо выбирать частоту дискретизации так чтобы полюсы сигнала находились как можно ближе к вершинам правильного многоугольника с центром в начале координат. Среднеквадратичная ошибка реконструкции сигнала на основе параметров, найденных методом Прони, составила 9% для квазиоптимальной частоты дискретизации $F_s = 3800$ Гц.

3. Для определения собственных частот механизмов производственно-технологических систем разработана модификация метода Прони, который использует совместный анализ оценок полюсов сигнала для определения параметров случайного потока экспоненциально затухающих синусоид.

В задаче нахождении собственных частот конструкции с подшипниковыми узлами получены дополнительные диагностические признаки. Экспериментальные исследования показали эффективность предложенного алгоритма и применима к сигналам, представляющим собой случайный поток затухающих синусоид, в отличие от классического метода Прони, который подгоняет шум под сумму синусоид.

4. Разработан новый алгоритм обработки информации для диагностики неисправности стержней ротора асинхронного двигателя и новый алгоритм обработки информации, уменьшающий время обработки сигналов кориолисового расходомера на основе рекуррентного метода матричных пучков для оценки параметров сигнала в режиме скользящего окна.

Для анализа модельного сигнала двигателя разработан алгоритм обработки информации позволяющий проводить диагностику неисправностей стержней ротора и с постепенным развитием дефекта стержня (такой сигнал затруднительно получить экспериментально) и отношением сигнал/шум 30 дБ. Показано, что метод в режиме скользящего окна определяет рост амплитуды гармоник, отвечающей за дефект, и что при увеличении длины окна N свыше 170 отсчетов рекуррентный метод матричных пучков превосходит классический метод по быстродействию более, чем в два раза. Технический эффект заключается в возможности раннего выявления обрыва стержней ротора по изменению амплитуды гармоник, характеризующей этот дефект.

Для уменьшения времени обработки сигналов кориолисового расходомера, в положен рекуррентный метод матричных пучков. В работе показано, что метод обеспечивает тот же результат, что и классический метод матричных пучков, но работает быстрее в 3.5 раза при оценке частоты сигнала с окном в $N = 100$ отсчетов (частота дискретизации $F_s = 512$ Гц, частота синусоиды около 90 Гц). Технический эффект заключается в достижении реального времени обработки даже на малопроизводительных встраиваемых системах, таких как микроконтроллеры STM32 H7, где классический метод неприемлем из-за вычислительной сложности.

5. Для оценки параметров нескольких сигналов с одинаковыми полюсами разработан многоканальный метод матричных пучков, и на его основе разработан новый алгоритм обработки информации, повышающий точность измерений кориолисового расходомера, а также новый алгоритм обработки информации для диагностики межвитковых замыканий асинхронного двигателя.

Задача коррекции показаний расходомера решается, в настоящее время, преимущественно с помощью нейронных сетей или SVM. Соискатель на основе исследования показала, что ансамбли деревьев решений больше подходят для этой задачи.

Многоканальный метод матричных пучков в задаче диагностики дефекта межвиткового замыкания в статоре асинхронного двигателя в 3 раза меньше занимает время работы и дисперсию, чем классический метод матричных пучков.

6. Разработан рекуррентный многоканальный метод матричных пучков для оценки в режиме скользящего окна параметров нескольких сигналов с одинаковыми полюсами, и на его основе разработан новый алгоритм обработки информации, повышающий точность измерений кориолисового расходомера.

Как показали исследования, рекуррентный многоканальный метод матричных пучков дает примерно в 2 раза меньшее среднеквадратичное отклонение в определении разности фаз сигналов с катушек расходомера Эл-Метро Фломак ДУ15 и величины расхода, чем классический метод и превосходит его по времени работы примерно в 4 раза. Длина окна обработки составила $N = 100$ отсчетов, частота дискретизации $F_s = 512$ Гц.

7. Для определения частот сигнала вибрации технологического оборудования разработан новый алгоритм обработки информации и на основе его разработана модификация метода матричных пучков за счет совместного анализа оценок полюсов сигнала и обратных к ним.

При возникновении неисправности существенно изменяется спектральный состав сигнала вибрации, что можно считать критерием возникновения неисправности, и разработанный соискателем метод позволяет это увидеть. Обрабатываются фрагменты длиной в 50 отсчетов, что соответствует 0.025 секундам. Критерием неисправности технологического оборудования является отличие спектрального состава сигнала вибрации от нормального случая, которое позволяет определить предложенный алгоритм.

8. Разработаны алгоритмы выделения информативных признаков из бесконечной суммы комплексных экспонент с целью дальнейшей классификации дефектов с помощью методов машинного обучения, и на их основе разработаны новые алгоритмы обработки информации для диагностики неисправностей подшипников качения. При повреждении одного из компонентов подшипника мы получим в спектре частот новую частоту, соответствующую поврежденному элементу и ее гармоники. Частоты зависят от угла контакта, поэтому любое небольшое изменение этого приведет к изменению рассчитанных частот отказа подшипника, что затруднит их идентификацию в спектре. Вызвать изменение угла контакта могут самые разные причины: несоосность, тепловое расширение, чрезмерное затягивание болтов, отслоение дорожек подшипника и т. д. Все это повлияет на эти предварительно рассчитанные частоты так, что они не будут точно совпадать с фактическими частотами, которые появляются в спектре. На основе гибридной нейронной сети Hybrid CNN-MLP со смешанным входом разработан алгоритм обработки информации, его применение в задаче диагностики подшипника показало точ-

ность 99,64% в задаче классификации состояний подшипника по результатам экспериментов. По результатам экспериментов, в задаче диагностики состояний двух подшипников, установленных на одном валу, точность обнаружения неисправности составила 99.3%, при точности ее локализации - 97%. Технический эффект алгоритма заключается в обеспечении высокой достоверности диагностики за счет комбинированного анализа различных характеристик сигналов вибрации.

Разработан вычислительно эффективный алгоритм обработки информации на основе полносвязной нейронной сети LPC-NN. Показано, что при недостатке данных для обучения сложной модели Hybrid CNN-MLP данный метод превосходит его не только по времени работы, но и по точности.

9. Разработана диагностическая модель на основе показаний датчиков системы АСУ ТП в условиях отсутствия прямых измерений суммы экспонент и новый алгоритм обработки информации для диагностики неисправностей плит клетки стана холодного проката, учитывающий накопление износа плит.

Впервые исследована проблема раннего обнаружения зарождения трещин в плитах системы SVC осевой сдвижки валков клетки стана холодного проката. Показана тесная связь процесса образования трещин и формы профиля поперечного сечения прокатываемой полосы. Описан процесс предварительной обработки больших данных АСУ ТП, выбор наиболее значимых признаков и построение модели, показывающей накопление износа плит, вызванное работой стана в экстремальных условиях из-за некачественного входного подката.

Результаты *метод (22), модель (26) и алгоритмы (4)* соответствуют классификатору наименований рекомендуемых результатов научно-технической деятельности.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена использованием научных работ отечественных и зарубежных авторов (295 источников, из них 205 работ зарубежных авторов) использующих методы и алгоритмы обработки информации для решения задач экспоненциального анализа. Работоспособность результатов подтверждена **тремя патентами РФ, четырьмя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.**

Подробный анализ задач экспоненциального анализа, методов, моделей и алгоритмов для обработки информации позволил выявить недостатки и сформировать расширенное дерево целей для научного исследования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается широкой апробацией работы в открытой печати (по материалам диссертационной работы опубликовано 18 работ, в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации, соответствующих специальности 2.3.1, в том числе 6 публикаций в изданиях К2, 12 статей в базах Scopus (Q1, Q2, Q3), WoS, RSCI и zbMATH). Общее число публикаций в РИНЦ - 63.

Значимость результатов, полученных в диссертации для науки и практики

Значимость для науки результатов, полученных в диссертации, подтверждается разработкой методов и алгоритмов для решения задач экспоненциального анализа. Использование фундаментального математического и физического аппарата позволяет перенести результаты исследования в любую промышленную область, в которой используются работа с большими данными и их обработка.

Создание программы преобразования сигнала для обучения диагностической модели, использующейся для выделения информативных признаков на основе мощности спектра в районе резонансных частот и изображений спектров Гильберта, а также обучение модели для диагностики промышленного оборудования, реализующей алгоритм обработки информации на основе гибридной нейронной сети со смешанным входом.

Диссертационная работа О.Л. Ибряевой в целом имеет законченный характер, написана четким, лаконичным языком, достаточно подробно иллюстрирована. Тема диссертации соответствует профилю научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Замечания по диссертационной работе

1. Во второй и третьей задачах исследования автор не определяет какие компоненты АСУ ТП и механизмы производственно-технологических систем будут исследованы.
2. На мой взгляд объектом исследования следует считать техническую систему, а не методы экспоненциального анализа.
3. В первой главе указано «Точная оценка гармоник в искаженном сигнале тока/напряжения энергосистемы имеет важное значение для эффек-

тивного проектирования фильтров для их подавления, поэтому разработка алгоритмов оценки их параметров чрезвычайно актуальна». В работе нет ни слова об этом.

4. Стр.61. «использовании разработанной нами формулы сплайнов для вычисления коэффициентов Тейлора». Где эта формула или ссылка на неё.

5. Стр.68 «...предложенных в параграфе 2.3, дает большую точность по сравнению с методом трапеций (на сколько и целесообразно ли его применять) интегрирования и дающие более точный результат, чем традиционные способы [111]». Не показано на сколько точный ни в работе ни в статье на которую ссылается автор.

6. «Модифицированный метод позволил уменьшить среднеквадратичное отклонение оценок фазы сигнала в 1.5 раза по сравнению с классическим методом, следовательно, оценка с помощью предложенного метода значения расхода в задаче обработки сигналов с кориолисового расходомера также будет в каждый момент времени точнее в 1.5 раза.» Почему?

7. Глава 5. для каждой модели был использован метод решетчатого поиска и процедура кросс-валидации. Почему только они.

8. Рис.5.11-12 не информативны. Где что?

9. Закорочено 8% витков, можно ли говорить о развитии аварийного процесса.

10. На стр. 214 время для выделения признаков - 0.00051с. Как определено это значение.

11. «...разрабатывать модель диагностики плит, принимающую на вход 27 главных компонент. А на рисунке 9.9 представлен вклад каждого из 40 признаков в главные компоненты?

12. На рисунке 9.17 синей линией представлен выход модели (ошибка восстановления временного ряда) и оранжевой – порог, равный 0.2. Почему?

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Представленная диссертационная работа Ибряевой Ольги Леонидовны на тему: «Методы и алгоритмы экспоненциального анализа для промышленных приложений в АСУ ТП», является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифици-

ровать как решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития методов экспоненциального анализа для промышленных приложений и их использование для решения технических задач.

Результаты работы отвечают требованиям гарантированной достоверности, обладают научной новизной и практической значимостью. Диссертация соответствует научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Тема и содержание диссертации соответствует п. 4 (Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации) и п. 5 (Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации) паспорта научной специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Таким образом, представленная к защите диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пунктами 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Ибряева Ольга Леонидовна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент

Доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры
«Электроника и микроэлектроника»
ФГБОУ ВО «Магнитогорский
Государственный технический
университет им.Г.И.Носова»



Петушков Михаил Юрьевич

21.11.2025

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук защищена по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Данные об организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Телефон: +7 (800) 100-1934

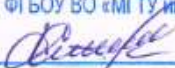
Email: mgtu@magtu.ru Сайт организации : <https://magtu.ru/>

Подпись Петушкова Михаила Юрьевича заверяю

*С отзывом ознакомлена
Ибряева О.Л. п.у
5.12.2025*

М.П.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Начальник отдела делопроизводства
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
 Д.Г. Семенова