

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и  
цифровому развитию

МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н., профессор

Дрогозов П.А.

«—» ноября 2025 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», на диссертацию Ибреевой Ольги Леонидовны «Методы и алгоритмы экспоненциального анализа для промышленных приложений в АСУ ТП», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

### 1. Актуальность работы

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) генерируют огромные объёмы данных, которые могут быть использованы для мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния промышленного оборудования. Одной из ключевых задач при обработке таких данных является экспоненциальный анализ — выделение параметров сумм комплексных экспонент из зашумленных сигналов. Эта задача возникает в самых разных приложениях: от обработки сигналов с расходомеров и вибродиагностики до анализа токовых сигналов электродвигателей.

Несмотря на существование классических методов (Прони, матричных пучков, Паде–Лапласа), их прямое применение в промышленных условиях сталкивается с рядом проблем: чувствительность к шуму, высокая вычислительная сложность, необходимость подбора частоты дискретизации, сложность обработки многоканальных и нестационарных сигналов.

Диссертационная работа Ибрыевой О.Л. направлена на решение этих проблем путём разработки новых модификаций методов экспоненциального анализа и создания на их основе эффективных алгоритмов обработки информации для промышленных применений. Предложенные методы позволяют повысить точность, быстродействие и надёжность диагностики оборудования, что делает данное исследование актуальным как с научной, так и с практической точки зрения.

## **2. Полученные результаты, их научная значимость**

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе Ибрыевой О.Л., заключаются в следующем:

- 1) Разработан новый алгоритм вычисления аппроксимаций Паде со знаменателем минимальной степени, не дающий ложных полюсов, вызванных неединственностью знаменателя аппроксимации, новый метод вычисления коэффициентов Тейлора, основанный на замене сигнала его сглаживающим сплайном, получена модификация метода Паде-Лапласа, и на ее основе разработан новый алгоритм обработки информации, повышающий точность измерений кориолисового расходомера.
- 2) 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 в задачах технической диагностики состояния компонентов АСУ ТП.
- 3) Разработана модификация метода Прони за счет совместного анализа оценок полюсов сигнала и обратных к ним для определения параметров случайного потока экспоненциально затухающих синусоид, и на ее основе разработан новый алгоритм обработки информации для определения собственных частот механизмов производственно-технологических систем.
- 4) Разработан рекуррентный метод матричных пучков для оценки параметров сигнала в режиме скользящего окна, и на его основе разработан новый алгоритм обработки информации для диагностики неисправности стержней ротора асинхронного двигателя, а также новый алгоритм обработки информации, уменьшающий время обработки сигналов кориолисового расходомера.
- 5) Разработан многоканальный метод матричных пучков для оценки параметров нескольких сигналов с одинаковыми полюсами, 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.

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.

7) Разработана модификация метода матричных пучков за счет совместного анализа оценок полюсов сигнала и обратных к ним для определения параметров случайного потока экспоненциально затухающих синусоид, и на ее основе разработан новый алгоритм обработки информации для определения частот сигнала вибрации с фрезерного станка.

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.

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 клети стана холодного проката, учитывающий накопление износа плит.

Все предложенные методы и алгоритмы обладают высокой научной новизной и прошли экспериментальную проверку на модельных и реальных данных. Принципиальная новизна заключается в создании промышленно-ориентированной методологии экспоненциального анализа, которая предназначена для работы с зашумленными данными в реальном времени и обеспечивает принципиально иной уровень робастности, скорости и точности.

Достигается это за счёт трёх ключевых элементов: целенаправленного подавления шума через минимизацию числа обусловленности, совместной обработки связанных сигналов для повышения точности оценок и использования рекуррентных вычислений, радикально снижающих сложность и обеспечивающих возможность непрерывного мониторинга.

### **3. Практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы имеют высокую практическую ценность, подтверждённую актами внедрения в промышленность и интересом со стороны ведущих инженерных центров. Основные практические результаты заключаются в следующем:

1) Предложены алгоритмы на основе модифицированного метода Паде-Лапласа, рекуррентного и многоканального методов матричных пучков для обработки сигналов кориолисовых расходомеров, позволяющие в режиме реального времени с высокой точностью оценивать частоту и разность фаз сигналов с измерительных катушек в условиях

двухфазных сред (например, при наличии пузырьков газа в жидкости). В результате внедрения в ООО «Элметро Групп» обеспечено повышение точности измерений массового расхода и плотности среды.

2) Разработана и внедрена диагностическая модель на основе автозэнкодера для анализа данных АСУ ТП стана холодной прокатки, позволяющая выявлять зарождение дефектов плит клети по косвенным признакам, аккумулирующим эффект износа. В результате внедрения на ПАО «ММК», ЛПЦ-11 создана система раннего предупреждения о необходимости замены плит, что привело к сокращению внеплановых простоев технологического оборудования и повышению общей надёжности работы прокатного стана).

3) Предложены высокоэффективные рекуррентные и многоканальные модификации метода матричных пучков, позволяющие в режиме скользящего окна с низкими вычислительными затратами отслеживать параметры токовых и вибросигналов (амплитуды боковых гармоник, фазовые сдвиги), характерные для таких дефектов, как обрыв стержней ротора и межвитковые замыкания в асинхронных двигателях. Полученные результаты представляют практический интерес для НТЦ «Приводная техника» и могут быть использованы при создании новых или модернизации существующих систем мониторинга и диагностики электроприводов, что позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию.

Таким образом, работа носит ярко выраженный прикладной характер, а её результаты направлены на решение актуальных задач повышения эффективности и надёжности работы промышленного оборудования в реальном секторе экономики.

#### **4. Оценка обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации строятся на комплексном применении строгого математического аппарата (методов линейной алгебры и вычислительной математики) и современных компьютерных технологий (математического моделирования, обработки сигналов и искусственного интеллекта). Достоверность полученных результатов обеспечена последовательной многоуровневой проверкой:

1) теоретической обоснованностью: все предложенные модификации алгоритмов (Паде-Лапласа, Прони, матричных пучков) имеют строгое математическое обоснование, базирующееся на анализе свойств матриц, сингулярном разложении и теории аппроксимации;

2) экспериментальной верификацией на модельных данных: корректность работы методов была подтверждена на модельных примерах с добавлением шума различного уровня, что позволило количественно оценить преимущества новых алгоритмов по сравнению с классическими аналогами;

3) подтверждением на реальных промышленных данных: ключевым доказательством достоверности является успешная апробация методов на реальных сигналах от промышленного оборудования (кориолисовых расходомеров, асинхронных двигателей, фрезерных станков, прокатного стана).

4) практическим внедрение: наиболее весомым аргументом в пользу достоверности выводов является успешное внедрение результатов работы на промышленных объектах (ООО «Элметро Групп», ПАО «ММК»), где они показали заявленную эффективность, выраженную в конкретных технико-экономических показателях.

5) широкой апробацией: основные результаты докладывались и получили положительную оценку на ряде международных и всероссийских научных конференциях, что свидетельствует о их признании научным сообществом.

Таким образом, комплексный подход к обоснованию, сочетающий теоретическую строгость, всестороннее компьютерное моделирование и успешную практическую реализацию, позволяет сделать вывод о полной достоверности научных положений и выводов диссертации.

## **5. Рекомендации по использованию результатов и выводов работы**

Результаты и выводы диссертационной работы Ибрайевой О.Л. обладают значительным научным и практическим потенциалом и настоятельно рекомендуются к широкому использованию.

В прикладной сфере и промышленности целесообразно использование следующих ключевых разработок:

1) Способ диагностики состояния обмоток статора асинхронного двигателя рекомендуется к внедрению в серийные программно-аппаратные комплексы диагностики электроприводов. Его применение на предприятиях энергетики, металлургии и машиностроения позволит реализовать стратегию обслуживания по фактическому состоянию, существенно повысив надежность оборудования и сократив затраты на внеплановые ремонты.

2) Алгоритмы обработки сигналов кориолисовых расходомеров целесообразно интегрировать в системы контроля технологических процессов химических, нефтегазовых и пищевых производств. Это позволит обеспечить высокую точность измерений расхода и

плотности в реальном времени даже в сложных условиях двухфазных потоков, что критически важно для учётных операций и повышения качества выпускаемой продукции.

3) Алгоритмы на основе рекуррентного метода матричных пучков рекомендуются к применению в системах онлайн-мониторинга критически важного оборудования (насосов, компрессоров, турбин). Его вычислительная эффективность позволяет в режиме реального времени отслеживать динамику параметров, обеспечивая раннее обнаружение дефектов.

4) Диагностическая модель на основе автоэнкодера обладает высокой универсальностью и может быть адаптирована для мониторинга широкого класса технологического оборудования (транспортные системы, сушильные установки, насосные станции) по данным существующих АСУ ТП. Это открывает путь к созданию масштабируемых систем предиктивной аналитики на промышленных предприятиях без необходимости масштабной установки дополнительных датчиков.

Таким образом, реализация представленных рекомендаций будет способствовать технологической модернизации отечественной промышленности, повышению надёжности и эффективности работы ключевых производственных активов.

## **6. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности**

Диссертационная работа полностью соответствует специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Соответствие содержания работы паспорту специальности комплексное и проявляется в следующих аспектах:

1. Разработаны и существенно развиты теоретические основы методов экспоненциального анализа (Паде-Лапласа, Прони, матричных пучков), которые являются фундаментом для решения задач системного анализа и обработки информации применительно к динамическим сигналам промышленных объектов (п. 1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

2. Автором проведена детальная формализация актуальных промышленных проблем (повышение точности расходомеров, диагностика дефектов двигателей, прогнозирование износа оборудования) в виде строгих математических задач экспоненциального анализа и идентификации параметров сложных сигналов (п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

3. В диссертации предложены новые критерии оценки эффективности методов, такие как минимизация числа обусловленности матриц для снижения усиления шума, критерии идентификации истинных полюсов в шуме, а также диагностические модели

(нейросетевые, на основе автоэнкодера) для оценки состояния оборудования (п. 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

4. Ядром работы являются новые и модифицированные алгоритмы (рекуррентный, многоканальный, модифицированный ММП и Прони), представляющие собой эффективные инструменты для решения задач обработки информации в реальном времени. (п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

5. Все теоретические разработки доведены до уровня практической реализации в виде конкретных алгоритмов и программных модулей, внедренных в промышленные системы (АСУ ТП ММК, программное обеспечение расходомеров), что подтверждает прикладную ценность проведенных исследований (п.5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

Таким образом, диссертация О.Л. Ибяевой является целостным научным исследованием, которое вносит значительный вклад в развитие специальности 2.3.1, поскольку сочетает глубокую теоретическую проработку с созданием практико-ориентированных алгоритмов и моделей для решения сложных задач промышленности.

## **7. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат диссертации О.Л. Ибяевой адекватно, полно и системно отражает содержание диссертационной работы. В нем четко изложены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, а также основные научные результаты и выводы. Все ключевые разработанные алгоритмы, методы и полученные практические результаты, включая примеры их внедрения, нашли отражение в автореферате. Структура и объем автореферата соответствуют установленным требованиям, что позволяет составить полное и объективное представление о содержании и научно-практической значимости диссертационного исследования.

## **8. Публикации и апробация диссертационной работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в 44 работах, включая 6 публикаций К2 в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации, соответствующих специальности

2.3.1, 12 статей в базах Scopus (Q1, Q2, Q3), WoS, RSCI и zbMATH. Получено 3 патента на изобретения и 4 свидетельства на программы для ЭВМ.

Результаты докладывались на 14 научно-технических и практических конференциях.

## 9. Замечания

- 1) Недостаточно четко обоснован выбор методов экспоненциального анализа в качестве базовых для решения поставленных задач, в частности, в сравнении с иными подходами, например, нелинейным методом наименьших квадратов или методом Фурье. Необходимо более детальное объяснение автором, в чем заключаются принципиальные преимущества используемых им методов применительно к конкретным промышленным задачам, рассмотренным в работе.
- 2) В работе представлены убедительные доказательства практической эффективности разработанных алгоритмов через внедрение, однако требуется более четко аргументировать, в каких именно задачах и за счет каких механизмов достигается улучшение (точности и быстродействия), а также представить сводные количественные оценки этого улучшения (во сколько раз, на сколько процентов).
- 3) В работе приведены данные о времени обработки сигнала с кориолисового расходомера длительностью 180 секунд: 45 секунд для классического и 13 секунд для рекуррентного метода матричных пучков. Однако непонятно, являются ли эти значения достаточными для работы в реальном времени на типовых промышленных контроллерах, учитывая их более низкую производительность по сравнению с использованным процессором.
- 4) В диссертации представлен глубокий математический аппарат модифицированных методов экспоненциального анализа. В то же время, физическая сущность таких модификаций, как многоканальный и рекуррентный методы, раскрыта недостаточно подробно. Каков физический смысл повышения точности в многоканальном методе и увеличения скорости в рекуррентном с точки зрения обработки сигналов?
- 5) Требуется уточнение физического смысла числа обусловленности для матриц, возникающих в методе Прони.
- 6) Предложенный в девятой главе диссертации метод предиктивной диагностики состояния плит клети стана холодного проката представляется узкоспециализированным решением, разработанным под конкретную технологическую задачу и набор данных конкретного производства. Возникает вопрос о границах применимости и потенциале тиражирования данного метода для диагностики других типов критически важного оборудования в различных отраслях промышленности.

7) Представленные в восьмой главе диссертации алгоритмы диагностики на основе машинного обучения (Hybrid CNN-MLP и LPC-NN) демонстрируют высокую точность, однако в работе отсутствует четкий анализ их требований к исходным данным и условий практического применения. Неясно, насколько данные методы адаптивны к реальным промышленным сценариям, которые часто характеризуются ограниченным объемом размеченных данных или отсутствием обширных архивов информации для обучения.

8) Ряд модификаций классических методов экспоненциального анализа (таких как рекуррентный и многоканальный ММП, модифицированный метод Прони), представленных в диссертации, по сути, решают те же задачи, что и их классические аналоги. В связи с этим возникает вопрос о практической целесообразности их применения: требуют ли новые методы дополнительных данных или сложной настройки, и является ли получаемое улучшение точности или быстродействия достаточно значимым для их внедрения вместо проверенных классических подходов?

## **10. Заключение**

Ведущая организация считает, что диссертационная работа Ибреевой Ольги Леонидовны «Методы и алгоритмы экспоненциального анализа для промышленных приложений в АСУ ТП» представляет собой завершенное научное исследование, выполненное на высоком научно-теоретическом и методическом уровне, и посвященное решению актуальной научной проблемы.

Все положения, выносимые на защиту, являются научно обоснованными и достоверными. Выводы и рекомендации логически вытекают из содержания работы и полностью соответствуют поставленным цели и задачам. Диссертация отличается целостностью и логичностью изложения, а также качественным оформлением.

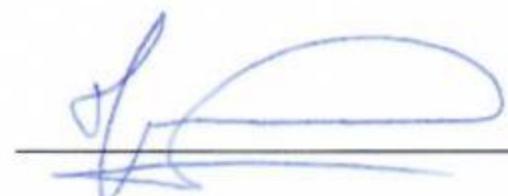
Полученные результаты обладают существенной научной новизной и высокой практической значимостью, что подтверждается актами их успешного внедрения в промышленность и демонстрирует эффективность предложенных автором решений.

Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук согласно пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор, Ибреева Ольга Леонидовна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Диссертационная работа и настоящий отзыв были обсуждены и одобрены на совместном заседании кафедр МТ4 «Метрология и взаимозаменяемость» и ИУ1 «Системы

автоматического управления» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», протокол № 12-25 от «05» ноября 2025 г.

Доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой МТ4 «Метрология и  
взаимозаменяемость», ФГАОУ ВО  
«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный  
исследовательский университет)»



/А.С. Комшин/

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой ИУ1 «Системы  
автоматического управления», ФГАОУ ВО  
«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный  
исследовательский университет)»



/К.А. Неусыпин/

17.11.2025

#### Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1

Тел.: +7 (499) 263 63 91

e-mail: bauman@bmstu.ru

Официальный сайт: <https://bmstu.ru/>

С отзывом ознакомлена  
О.А. Ибреева 17  
1.12.2025