Шаханов Никита Иванович. Метод и алгоритмы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства на основе машинного обучения: автореферат дис. ... кандидата Технических наук: 05.13.06 / Шаханов Никита Иванович;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»], 2018

Министерство науки и высшего образования РФ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет»

*На правах рукописи*

*<4г&~*

ШАХАНОВ НИКИТА ИВАНОВИЧ

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ УБОРОЧНОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Специальность: 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в металлургии)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, **Юдина О.В.**

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, **Ершов Е.В.**

Череповец - 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark3)

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ УБОРОЧНОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВАМ
   1. [Анализ моделей, методов и технических средств для решения задач прогнозирования отказов промышленного оборудования прокатного производства 12](#bookmark6)
   2. [Анализ оборудования уборочной группы прокатного производства как объекта прогнозирования отказов 21](#bookmark7)
   3. [Разработка требований к математическому и алгоритмическому обеспечению системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства 28](#bookmark8)
   4. [Выводы по разделу 32](#bookmark10)
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ

[ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ УБОРОЧНОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА 33](#bookmark11)

* 1. [Модель прогнозирования временных рядов крутящих моментов приводных электродвигателей отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства 33](#bookmark12)
  2. [Результаты моделирования на основе стекинга алгоритмов машинного обучения Random Forest и Arima 38](#bookmark14)
  3. [Метод прогнозирования отказов оборудования с использованием параметрической идентификации 45](#bookmark17)
  4. [Выводы по разделу 52](#bookmark20)

з

1. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ

[ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ УБОРОЧНОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА 53](#bookmark4)

* 1. [Алгоритм сбора, хранения, извлечения и обработки данных о работе оборудования 53](#bookmark22)
  2. [Алгоритм распределенного обучения модели прогнозирования работы оборудования 56](#bookmark24)
  3. Алгоритм выявления отказов в условиях малого количества поломок 60
  4. [Обобщенный алгоритм функционирования системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства 63](#bookmark29)
  5. [Выводы по разделу 66](#bookmark30)

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ

[АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ УБОРОЧНОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА 67](#bookmark21)

* 1. Основные функциональные элементы и блоки системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства 67
  2. Методика настройки алгоритмического обеспечения системы прогнозирования для обработки больших объемов данных на платформе Hadoop 74
  3. [Результаты экспериментальных исследований алгоритмического обеспечения 76](#bookmark32)
  4. [Перспективы применения разработанных метода и алгоритмов прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства 85](#bookmark34)
  5. [Выводы по разделу 87](#bookmark35)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 88

[СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 90](#bookmark36)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ 103

[ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 126](#bookmark42)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ИСХОДНЫЙ КОД СКРИПТОВ 128

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ 141

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Эксплуатация промышленного оборудования предполагает воздействие на него большого количества различных факторов, которые вызывают изменения в техническом состоянии, что со временем приводит к отказу. Существенной особенностью этих факторов является их случайный (стохастический) характер. К факторам, оказывающим наиболее существенное влияние на скорость изменения технического состояния оборудования, относятся: технологические нагрузки, прочностные

характеристики материала, геометрические размеры. Кроме них, необходимо выделить такие факторы как: соблюдение условий технологического процесса, качество технического обслуживания и ремонта, вибрация, температура и др. Случайных характер рассмотренных факторов приводит к непредсказуемому изменению технического состояния устройств, их узлов, механизмов, следовательно, и времени работы до отказа.

В настоящее время основными стратегиями выполнения ремонтов являются стратегия «Ремонт после отказа», что сопровождается большими затратами и стратегия «Планово-предупредительный ремонт», что в половине случаев является, как правило, преждевременным. Вместе с тем наиболее перспективной представляется стратегия «Ремонт по состоянию» с использованием предиктивного подхода к техническому обслуживанию, который позволяет заранее определять возможные отказы оборудования, тем самым повышая эксплуатационную надежность.

Для решения задачи прогнозирования отказов промышленного оборудования предложено множество моделей и методов, отличающихся набором входных данных и формой представления результатов. Традиционно применяются вероятностные методы и методы статистического анализа данных, изложенные в работах: [1-8]. Данные методы обеспечивают достоверность прогноза отказов оборудования при различных условиях эксплуатации только при наличии модели формирования отказов, описывающей процессы повреждения или отклонения от нормального функционирования, основанной на данных об оборудовании, относящихся к прошедшим периодам.

Другая группа применяемых методов основана на интеллектуальном анализе относительно больших массивов данных [9-18]. Целью такой обработки является извлечение из имеющихся массивов данных закономерностей и зависимостей, позволяющих строить прогнозные модели на основе статистических методов. Данные методы дают хорошие результаты для выявления одиночных отказов и идентификации их локальных эффектов. Однако они не обеспечивают приемлемых результатов в случае множественных отказов и их эффектов на системном уровне, что ограничивает применение в режиме реального времени.

Наиболее перспективными являются методы, основанные на машинном обучении [19-26], позволяющие строить прогнозные модели с использованием как ретроспективных, так и текущих данных, поступающих в реальном времени с измерительной аппаратуры и получать неочевидные на первый взгляд закономерности. Способность к обучению дает возможность оперативно корректировать параметры моделей прогнозирования при изменяющихся условиях функционирования оборудования и определять новые сроки проведения плановых ремонтов, значительно минимизируя простои оборудования. Существенным ограничением использования данных методов являются ситуации, когда отказы оборудования происходят достаточно редко или отсутствуют статистические данные по отказам.

В связи с этим разработка математического и алгоритмического обеспечения для прогнозирования отказов на основе методов машинного обучения в условиях малого количества поломок и изменяющихся режимах работы оборудования является актуальной научной задачей.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является повышение точности прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи:**

1. Выполнить анализ проблемы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.
2. Разработать математическое обеспечение для прогнозирования отказов на основе методов машинного обучения в условиях малого количества поломок и изменяющихся режимах работы оборудования.
3. Разработать алгоритмическое обеспечение для прогнозирования отказов оборудования уборочной группы.
4. Выполнить экспериментальные исследования разработанного математического и алгоритмического обеспечения программного комплекса с применением платформы Hadoop.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является

система прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства. Предметом исследования являются методы и алгоритмы

прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного

производства.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического моделирования, алгоритмы машинного обучения, бинарные деревья решений, алгоритмы распределенной и параллельной обработки данных, программные и языковые средства современных компьютерных технологий.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана новая модель прогнозирования временных рядов крутящих моментов приводных электродвигателей отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства, использующая стекинг алгоритмов машинного

обучения Random Forest и ARIMA при изменяющихся режимах работы оборудования.

1. Разработан метод прогнозирования отказов оборудования с использованием параметрической идентификации в условиях малого числа аномальных прецедентов для обучения, больших объемов данных и изменяющихся режимах работы оборудования.
2. Разработано алгоритмическое обеспечение прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства, в составе:

* алгоритма сбора, хранения, извлечения и обработки данных о работе оборудования;
* алгоритма распределенного обучения модели прогнозирования работы оборудования;
* алгоритма выявления отказов в условиях малого количества поломок;
* обобщенного алгоритма функционирования системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

**Практическая значимость** результатов исследования заключается в том, что реализация разработанных теоретических положений позволила:

* повысить точность прогнозирования отказов на 9,5 %;
* снизить количество внеплановых простоев до 15 %;
* разработать структурно-функциональную организацию системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства;
* разработать методику настройки алгоритмического обеспечения системы прогнозирования для обработки больших объемов данных на платформе Hadoop;
* повысить качество планирования ремонтов оборудования уборочной группы прокатного производства.

**Реализация результатов диссертационной работы.**

Разработанные метод и алгоритмы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства прошли экспериментальную проверку в листопрокатном цехе №2 производства горячекатаного проката ПАО «Северсталь».

Результаты исследования были успешно внедрены и используются в Центре автоматизированных систем ПАО «Северсталь» Центр «Промсервис» при построении системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

Предложенные метод и алгоритмы прогнозирования отказов используются в учебном процессе на кафедре «Математическое и программное обеспечение ЭВМ» Череповецкого государственного университета в дисциплинах: «Моделирование программно-информационных систем», «Методы и средства разработки информационного и программного обеспечения», «Надежность информационных систем», по направлениям подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника (уровень бакалавриата), 09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата) и 09.04.04 Программная инженерия (уровень магистратуры).

**Соответствие паспорту специальности.** Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 14, 16 паспорта специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в металлургии) (п. 14. Теоретические основы, методы и алгоритмы

диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др., п. 16. Теоретические основы, методы и алгоритмы построения экспертных и диалоговых подсистем, включенных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на научно- практических конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения - 2016» (Череповец, 16-17 ноября 2016 г.), Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых в рамках Программы развития деятельности студенческих объединений Череповецкого

государственного университета «PAIION ІТ» «Молодежь и новые информационные технологии» (Череповец, 17-18 ноября 2016 г.), III

Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии. Теория и практика» (Череповец, 30 ноября 2016 г.), XV Всероссийской научной конференции с международным участием «Вузовская наука - региону» (Вологда, 28 февраля 2017 г.), XII Международной научно- технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 21 марта 2017 г.), XIII Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 16-19 мая 2017 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензированных журналах и изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования, и 4 приложений. Объем диссертационной работы 141 страница. В тексте диссертации содержится 21 рисунок и 8 таблиц.

**В первом разделе** проанализированы существующие модели, методы, технические средства для решения задач прогнозирования отказов промышленного оборудования прокатного производства, рассмотрено оборудование уборочной группы прокатного производства как объект прогнозирования отказов; разработаны требования к математическому и алгоритмическому обеспечению системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

**Во втором разделе** дано описание модели прогнозирования временных рядов крутящих моментов приводных электродвигателей отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства, приведены результаты моделирования. Представлен метод прогнозирования отказов оборудования, основанный на предиктивном анализе полученных временных рядов значений крутящих моментов.

**В третьем разделе** разработано алгоритмические обеспечение системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства: алгоритм сбора, хранения, извлечения и обработки данных о работе оборудования; алгоритм распределенного обучения модели прогнозирования работы оборудования; алгоритм выявления отказов в условиях малого количества поломок и обобщенный алгоритм функционирования системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

**В четвертом разделе** определены основные функциональные элементы и блоки системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства, разработана методика настройки алгоритмического обеспечения системы прогнозирования для обработки больших объемов данных на платформе Hadoop, проведены экспериментальные исследования алгоритмического обеспечения, представлены перспективы применения разработанных метода и алгоритмов прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.

**Заключение** содержит краткое описание основных результатов диссертационной работы.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно- технической задачи повышения точности прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства были получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ проблемы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.
2. Разработана модель прогнозирования временных рядов крутящих моментов приводных электродвигателей отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства, использующая стекинг алгоритмов машинного обучения Random Forest и ARIMA при изменяющихся режимах работы оборудования.
3. Разработан метод прогнозирования отказов оборудования с использованием параметрической идентификации в условиях малого числа аномальных прецедентов для обучения, больших объемов данных и изменяющихся режимах работы оборудования.
4. Разработано алгоритмическое обеспечение системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства, в составе: алгоритма сбора, хранения, извлечения и обработки данных о работе оборудования; алгоритма распределенного обучения модели прогнозирования работы оборудования; алгоритма выявления отказов в условиях малого количества поломок; обобщенного алгоритма функционирования системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства.
5. Использование системы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства позволило увеличить точность прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства на 9,5 *%.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Прогнозирование сроков отказа металлургического оборудования / Седуш В .Я., Ченцов Н.А., Ченцова Н.С. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1994. №3. - С.75-77. 1. Прогнозирование сроков

отказа металлургического оборудования / Седуш В.Я., Ченцов Н.А., Ченцова Н.С. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 1994. №3. - С.75-77.

1. Антонов А.В. Вероятностные методы оценки остаточной наработки восстанавливаемых элементов ЯЭУ в условиях ограниченности исходных данных /Соколов С.В., Антонов А.В., Чепурко В.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. - **Т.** 2. - № 5. - С. 421-424.
2. Антонов А.В. Методика статистического анализа данных об отказах оборудования АЭС в условиях неоднородного потока событий / Антонов А.В., Чепурко В.А. // Известия высших учебных заведений. — Ядерная энергетика. - 2016. -№ 3. - С. 20-29.
3. Alestra S., Brand С., Burnaev Е., Erofeev P., Papanov A., Bordry C., Silveira-Freixo. C. Rare

eventanticipationanddegradationtrendingforaircraftpredictivemaintenance // В сборнике: 11th World Congresson Computational Mechanics, WCCM 2014, 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECFD 2014 11, - 2014. - C. 6571-6582.

1. Перехвост B.C., Прогнозирование параметрических отказов и особенность случайных процессов старения технических систем / B.C. Перехвост, Е.А. Кривонос, А.А. Чебукина // Краснодар: Научные труды кубанского государственного технологического университета, №3, - 2014 - С. 38-44.
2. Javed К. State of the artand taxonomy of prognostics approaches, trends of prognostics application sand openissues to wardsmaturity at different technology readiness levels / Javed K., Gouriveau R. Zerhouni N. // MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING. - № 9, 2017. - V. 94. - p. 214-236.