

АННОТАЦИЯ

**На диссертационную работу Мадина Владимира Анатольевича на тему
«Разработка и исследование моделей интеллектуального анализа
больших данных в задачах планирования» на соискание степени
доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 –
«Информационные технологии и робототехника»**

Актуальность темы исследования определяется современными тенденциями цифровой трансформации промышленности и развитием интеллектуальных производственных систем, основанных на использовании методов анализа больших данных, машинного обучения и оптимизационного моделирования. В условиях Industry 4.0 производственные системы все в большей степени функционируют как киберфизические комплексы, в которых данные мониторинга оборудования, производственных процессов и технологических операций становятся ключевым ресурсом для повышения эффективности управления и принятия решений.

Развитие цифровых производственных платформ сопровождается переходом от традиционных методов календарного планирования к интеллектуальным системам поддержки принятия решений, способным учитывать неопределенность параметров производственных процессов, вариативность длительностей операций и техническое состояние оборудования. При этом календарно-производственное планирование рассматривается как часть интегрированного контура управления производством, включающего сбор данных, прогнозирование параметров процессов и адаптацию производственных расписаний.

В Республике Казахстан вопросы цифровизации промышленности, внедрения интеллектуальных информационных систем и развития технологий анализа данных рассматриваются как одно из приоритетных направлений научно-технологического развития. В этих условиях возрастает необходимость разработки методов интеллектуального планирования производственных процессов, обеспечивающих повышение устойчивости производственных систем и эффективности использования оборудования.

Одной из ключевых задач управления производственными системами является формирование эффективных производственных расписаний, обеспечивающих рациональное использование ресурсов и соблюдение технологических ограничений. Классической математической моделью подобных задач является задача календарного планирования типа Job Shop Scheduling Problem (JSSP). Несмотря на значительный прогресс в области методов дискретной оптимизации и теории расписаний, большинство существующих моделей планирования основано на детерминированных значениях параметров и не учитывает неопределенность производственных процессов.

В реальных условиях функционирования предприятий длительности операций, загрузка оборудования и вероятность отказов подвержены значительным колебаниям, что снижает устойчивость расписаний и требует

разработки методов планирования, способных учитывать неопределенность параметров производственных процессов. Одновременно с этим активно развиваются методы машинного обучения, позволяющие прогнозировать параметры производственных систем и техническое состояние оборудования на основе анализа данных мониторинга.

Особое значение в производственных системах приобретает направление предиктивного обслуживания оборудования (Predictive Maintenance), ориентированное на прогнозирование остаточного ресурса оборудования на основе сенсорных данных. Несмотря на значительное количество исследований в области машинного обучения и предиктивного обслуживания, прогнозные модели чаще всего используются изолированно от задач календарного планирования, а их формализованная интеграция в оптимизационные модели остается недостаточно разработанной.

Таким образом, в современной научной и инженерной практике сформировались три взаимосвязанных направления исследований: календарное планирование производственных процессов, методы машинного обучения для прогнозирования параметров производственных систем и методы предиктивного обслуживания оборудования. Их интеграция в рамках единой вычислительной архитектуры интеллектуального планирования представляет собой актуальную научную задачу.

Необходимость разработки методов, обеспечивающих формализованную интеграцию прогнозных моделей машинного обучения, данных предиктивного обслуживания оборудования и оптимизационных процедур календарного планирования в едином вычислительном контуре, определяет научную проблему настоящего исследования.

Целью докторской диссертации является разработка и апробация комплекса моделей интеллектуального анализа больших данных для прогнозного планирования производственной деятельности, направленного на повышение обоснованности и эффективности управленческих решений в условиях неопределенности параметров производственных процессов.

Задачи диссертационного исследования:

- проанализировать современные методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения, применяемые в задачах прогнозирования и календарного планирования в производственных системах;
- разработать концептуальную модель интеграции разнородных данных производственного и эксплуатационного характера, а также внешних факторов, рассматриваемых как расширяемые источники информации в задачах прогнозного планирования;
- построить гибридные модели прогнозирования с формализованной процедурой оценки неопределенности прогнозов;
- разработать оптимизационную модель формирования производственного плана с учетом сценарных ограничений по рискам и квантильным прогнозным оценкам параметров операций;
- интегрировать прогнозные модели и данные предиктивного обслуживания в единый контур планирования;

- провести экспериментальную апробацию методики на открытых наборах данных с сравнением результатов с базовыми методами по метрикам точности прогнозирования, устойчивости решений и вычислительной эффективности.

Объект исследования: процессы календарного планирования производственной деятельности в условиях неопределенности параметров выполнения операций и состояния оборудования.

Предмет исследования: гибридные прогнозно-оптимизационные модели календарного планирования производственной деятельности, основанные на интеграции прогнозных моделей машинного обучения и оптимизационных методов посредством формирования сценарных ограничений, учитывающих неопределенность параметров производственных процессов.

Методы исследования. В диссертационной работе на различных этапах использовались методы системного анализа и математического моделирования сложных производственных систем, методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных, методы оптимизационного моделирования и комбинаторной оптимизации, а также методы математической статистики для оценки точности прогнозирования, робастности получаемых решений и верификации результатов вычислительных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

- модель гибридного прогнозно-оптимизационного календарного планирования, основанная на использовании квантильных прогнозов параметров производственных процессов и обеспечивающая интеграцию результатов прогнозных моделей машинного обучения в оптимизационные модели календарного планирования для учета неопределенности длительностей операций;

- математическая модель календарного планирования с учетом рисков технического состояния оборудования, основанная на использовании сценарных ограничений, формируемых по результатам анализа показателей предиктивного обслуживания оборудования;

- алгоритм интеграции прогнозных моделей машинного обучения и оптимизационного планирования, реализующий вычислительный контур «прогнозирование – синтез ограничений – оптимизация – анализ устойчивости» и обеспечивающий повышение устойчивости формируемых производственных расписаний.

Основные результаты исследования. В результате проведенного исследования разработан гибридный прогнозно-оптимизационный подход к решению задач календарного планирования, основанный на интеграции методов машинного обучения, предиктивного обслуживания оборудования и дискретной оптимизации. Предложена архитектура интеллектуальной системы планирования, объединяющая квантильные прогнозные модели длительности операций, оценку PdM-рисков оборудования и

оптимизационную модель календарного планирования на основе решателя CP-SAT.

Разработана модель машинного обучения для формирования квантильных прогнозов длительности операций (P10, P50, P90), позволяющая учитывать неопределённость производственных процессов при формировании оптимизационных ограничений. Предложен метод интеграции показателей технического состояния оборудования в задачу календарного планирования на основе агрегированных PdM-рисков.

Разработана оптимизационная модель календарного планирования с адаптивными сценарными ограничениями, реализующая сценарии планирования S0-S5 и механизм последовательного ослабления ML-ограничений при отсутствии допустимого решения. Создан программный прототип интеллектуальной системы планирования, обеспечивающий прогнозирование параметров производственных процессов, формирование расписаний и аналитическую визуализацию результатов.

Проведённые вычислительные эксперименты на эталонных экземплярах задачи JSSP подтвердили работоспособность предложенного подхода и показали, что использование прогнозных моделей машинного обучения в составе ML-CP-SAT-конвейера повышает устойчивость оптимизационного процесса и обеспечивает формирование допустимых расписаний в условиях неопределённости.

Научная новизна состоит в разработке и обосновании гибридного прогнозно-оптимизационного подхода к календарному планированию производственной деятельности, основанного на интеграции моделей машинного обучения и методов оптимизации на ограничениях. Разработана методика формирования сценарных ограничений оптимизационной модели на основе квантильных прогнозов длительности операций для учета неопределённости параметров производственных процессов. Разработан способ интеграции оценок технического состояния оборудования, полученных методами предиктивного обслуживания, в контур календарного планирования. В рамках предложенного подхода реализован единый вычислительный контур «прогнозирование – синтез ограничений – оптимизация – анализ устойчивости», обеспечивающий воспроизводимость вычислительных экспериментов и интерпретируемость плановых решений.

Теоретическая значимость заключается в развитии методов интеграции моделей машинного обучения и оптимизационных процедур календарного планирования производственных процессов в условиях неопределённости. Предложена формализованная схема интеграции прогнозных моделей и оценок технического состояния оборудования в оптимизационную постановку задачи планирования, основанная на использовании квантильных оценок параметров операций и расширяющая методологию робастного планирования производственных процессов.

Практическая значимость заключается в разработке программного прототипа интеллектуальной системы календарного планирования, интегрирующей методы машинного обучения, предиктивного обслуживания

оборудования и оптимизационного моделирования. Предложенные методы гибридного прогнозно-оптимизационного планирования могут быть использованы при создании и модернизации систем поддержки принятия решений в области календарного планирования производственных процессов, а также в образовательной практике при подготовке специалистов в области анализа данных и интеллектуальных информационных систем.

Внедрение результатов исследовательской работы. Результаты диссертационного исследования внедрены на практике в ТОО «ОПТИСОРТ» с целью повышения обоснованности и качества решений в области календарного планирования производственных процессов за счет использования прогнозных моделей и сценарного анализа.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Программного обеспечения» НАО КРУ имени Ахмет Байтұрсынұлы, а также на международном вебинаре «Методы искусственного интеллекта», г. Костанай, 2022 г.

В международных изданиях с ненулевым импакт-фактором, входящим в базу данных Scopus – 1 статья. Вклад автора состоит в формулировке научной гипотезы, сборе и предварительной обработке данных, разработке и технической реализации экспериментальной части исследования, интерпретации полученных результатов и подготовке публикации:

1. Enhancing electricity consumption forecasting in the Republic of Kazakhstan using machine learning // Journal of Applied Engineering and Technological Science. – 2025. – Vol. – 6(2). – P. 1166-1196. <https://doi.org/10.37385/jaets.v6i2.7425>.

Статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования РК – 6 статей. В данных публикациях автор разрабатывал концепцию исследования и методологию анализа данных, участвовал в сборе данных, интерпретации результатов и подготовке научных статей к публикации:

1. Свёрточные и глубокие нейронные сети // Вестник КазАТК. – 2023. – № 126(3) С. 189-197. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-126-3-189-197>.

2. Сравнительный анализ форматов протоколов для обработки данных в сенсорных сетях интернета вещей // Вестник КазАТК. – 2024. – № 134(5) С. 465-473. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-465-473>.

3. Adaptive process management using deep learning on a programmable logic controller (PLC) // International journal of information and communication technologies. – 2024. – Vol. 5. Is. 1. № 17 P. 8-28. <https://doi.org/10.54309/IJICT.2024.17.1.001>.

4. Анализ моделей RNN и TRANSFORMER в задачах обработки естественного языка // Вестник КазАТК. – 2025. – № 138(3) С. 311-321. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-138-3-311-321>.

5. Предиктивное обслуживание шпиндельных подшипников на основе вибродиагностики (на примере токарного станка СКЕ 6136/6150) // Вестник КазУТБ. – 2025. - Т. 3. Вып. 28. С. 63-79.

6. Динамическая реконфигурация алгоритмов управления в программируемом логическом контроллере для гибкой автоматизации производственных процессов // Вестник ВКТУ. – 2025. – №4(110) С. 174-185.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи исследования, разработке концепции гибридного прогнозно-оптимизационного подхода к календарному планированию, анализе научной литературы по задачам календарного планирования, машинного обучения, предиктивного обслуживания оборудования и дискретной оптимизации. Автором разработаны архитектура интеллектуальной системы планирования, модели квантильного прогнозирования длительностей операций, метод интеграции PdM-рисков оборудования в оптимизационную модель, сценарный механизм применения ML-ограничений, а также выполнена программная реализация прототипа системы, подготовка и обработка данных, проведение вычислительных экспериментов и анализ полученных результатов. Все основные результаты диссертационной работы получены автором лично.

Публикации по теме диссертационного исследования. По теме диссертационного исследования было опубликовано 7 (семь) научных трудов, из них 6 (шесть) статей в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования РК, 1 (одна) статья в международном научном издании, входящих в базу Scopus. Также имеется 2 (два) авторских свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертационной работы составляет 137 страницы (38 рисунков и 17 таблиц).

Во введении обоснована актуальность темы исследования, связанная с необходимостью повышения эффективности календарно-производственного планирования в условиях неопределённости длительностей операций и рисков отказов оборудования. Показана значимость применения методов машинного обучения, предиктивного обслуживания и дискретной оптимизации для интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах производственного планирования. Сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первом разделе диссертационной работы выполнен анализ современного состояния методов календарного планирования и интеллектуального анализа данных в производственных системах. Рассмотрены математические постановки задачи Job Shop Scheduling Problem (JSSP), методы дискретной оптимизации и подходы к робастному планированию. Проанализированы возможности применения методов машинного обучения для прогнозирования параметров производственных

процессов и оценки технического состояния оборудования. Показано, что интеграция прогнозных моделей и оптимизационных алгоритмов является перспективным направлением развития интеллектуальных систем планирования.

Во втором разделе разработана методологическая основа гибридного прогнозно-оптимизационного подхода к календарному планированию. Выполнена формализация задачи календарного планирования с учётом неопределённости длительностей операций и рисков деградации оборудования. Предложена расширенная оптимизационная модель календарного планирования, использующая квантильные прогнозы длительностей операций и агрегированные показатели PdM-рисков. Разработан сценарный механизм применения прогнозных ограничений и адаптивная схема их ослабления при отсутствии допустимых решений.

В третьем разделе разработаны модели машинного обучения для прогнозирования длительностей операций и оценки рисков деградации оборудования. Реализована гибридная модель квантильного прогнозирования на основе ансамблевых и нейросетевых методов, позволяющая формировать оценки P10, P50 и P90 длительностей операций. Выполнена разработка модели предиктивного обслуживания оборудования на основе диагностических данных. Проведены вычислительные эксперименты, подтвердившие возможность использования прогнозных оценок в качестве параметров оптимизационной модели календарного планирования.

В четвёртом разделе проведено экспериментальное исследование предложенного гибридного ML-CP-SAT-подхода на эталонных экземплярах задачи календарного планирования. Выполнено сравнение различных сценариев планирования с использованием прогнозных ограничений и PdM-рисков. Проанализировано влияние сценариев на значение целевой функции, устойчивость решений и вычислительные характеристики оптимизационного процесса. Показано, что использование прогнозных моделей позволяет повысить управляемость оптимизационного поиска и устойчивость процесса планирования.

В пятом разделе представлена практическая реализация интеллектуальной системы календарного планирования в виде программного прототипа, интегрирующего модули машинного обучения, оценки PdM-рисков и оптимизационный решатель CP-SAT. Разработан пользовательский интерфейс системы, реализованы режимы single-instance и batch-планирования, а также модуль поддержки принятия решений. Проведена экспериментальная апробация разработанного прототипа, подтвердившая работоспособность предложенного подхода и возможность его использования в задачах производственного планирования и образовательных исследованиях.

В заключении приведены основные результаты исследования и сформулированы выводы, подтверждающие достижение поставленной цели и решение задач диссертационной работы. В приложениях представлены авторские свидетельства и акт внедрения.

Диссертационная работа выполнена в рамках проекта программно-целевого финансирования по теме BR24992785 «Организация и проведение комплексных исследований по обеспечению устойчивого развития агропромышленного комплекса Костанайской области с созданием научно-исследовательского технологического центра», реализуемого в соответствии с приоритетными направлениями научно-технологического развития Республики Казахстан.