

## Разработка моделей прогнозирования и управления для автоматизированных производственных систем

**Артем Викторович Добриневский**

Магистрант

Москва, Россия

Российский биотехнологический университет

Исполнительный директор

ЗАО «Комбинат дошкольного питания» Город, страна

Москва, Россия

7567089@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 06.11.2023

Принята 27.12.2023

Опубликована 28.02.2024

УДК 004.942:658.5

EDN MMXKWX

BAK 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

### Аннотация

В современных условиях динамично развивающегося производства и нарастающей конкуренции на рынке актуальной задачей является разработка эффективных моделей прогнозирования и управления для автоматизированных производственных систем (АПС). Данное исследование направлено на создание комплексного подхода к моделированию и оптимизации функционирования АПС с целью повышения эффективности производственных процессов, снижения затрат и обеспечения высокого качества выпускаемой продукции. Для достижения поставленных целей были применены методы математического моделирования, теории управления, оптимизации и интеллектуального анализа данных. В частности, были разработаны стохастические модели прогнозирования спроса на продукцию, учитывающие сезонные колебания и тренды рынка. Такие модели позволяют с точностью до 95% предсказывать объемы продаж на период от 1 до 6 месяцев. Для управления производственными процессами были предложены адаптивные алгоритмы планирования и диспетчеризации, основанные на методах нечеткой логики и генетических алгоритмах. Использование данных подходов позволило сократить время переналадки оборудования на 20-25% и снизить объемы незавершенного производства на 15%. Проведенные экспериментальные исследования на примере реального машиностроительного предприятия подтвердили эффективность разработанных моделей и алгоритмов. Внедрение предложенных решений позволило увеличить производительность АПС на 12%, сократить затраты на сырье и материалы на 8% и повысить качество выпускаемой продукции, снизив процент брака с 1,5% до 0,8%. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость и могут быть использованы для повышения конкурентоспособности и эффективности функционирования предприятий различных отраслей промышленности. Дальнейшие исследования будут направлены на развитие предложенных подходов и их адаптацию для решения новых задач в условиях цифровизации производства и перехода к концепции «Индустрия 4.0».

### Ключевые слова

автоматизированные производственные системы, прогнозирование, управление, оптимизация, адаптивные алгоритмы, нечеткая логика, генетические алгоритмы, эффективность, конкурентоспособность.

### Введение

Стремительное развитие современных технологий, глобализация рынков и ужесточение конкуренции обуславливают необходимость постоянного совершенствования и оптимизации производственных процессов. Одним из ключевых факторов обеспечения конкурентоспособности и эффективности функционирования предприятий является внедрение автоматизированных производственных систем (АПС), позволяющих повысить производительность, сократить затраты и улучшить качество выпускаемой продукции (Hegde, 2020). Однако, несмотря на значительные преимущества АПС, их практическое использование сопряжено с рядом проблем и вызовов, обусловленных сложностью и динамичностью современных производственных процессов, необходимостью учета множества факторов и ограничений, а также наличием неопределенностей и рисков (Антонов, 2018).

В этих условиях актуальной научно-практической задачей является разработка эффективных моделей прогнозирования и управления для АПС, обеспечивающих принятие обоснованных решений в условиях неопределенности и позволяющих достичь высоких показателей эффективности производства. Существующие подходы к моделированию и оптимизации АПС, основанные на классических методах математического программирования и теории расписаний, зачастую оказываются недостаточно гибкими и адаптивными для решения сложных задач современного производства (Байбаров, 2021). В связи с этим возникает необходимость в разработке новых методов и алгоритмов, учитывающих специфику конкретных предприятий и производственных процессов, а также позволяющих эффективно справляться с неопределенностями и изменениями внешней среды.

Одним из перспективных направлений исследований в данной области является использование интеллектуальных методов анализа данных и поддержки принятия решений, таких как нечеткая логика, нейронные сети, генетические алгоритмы и др. (Барсегян, 2020). Данные подходы позволяют строить гибкие и адаптивные модели, способные обучаться на основе накопленного опыта и приспосабливаться к изменяющимся условиям функционирования АПС. Так, в работе (Боровков, 2019) предложена нейро-нечеткая модель прогнозирования спроса на продукцию предприятия, учитывающая влияние сезонных факторов и позволяющая повысить точность планирования производства на 10-15% по сравнению с классическими методами экстраполяции. В исследовании (Гуськов, 2020) разработан генетический алгоритм оптимизации расписания работы оборудования, позволивший сократить время переналадки станков на 20% и повысить коэффициент загрузки оборудования на 5%.

Несмотря на значительный прогресс в области моделирования и оптимизации АПС, многие вопросы остаются открытыми и требуют дальнейших исследований. В частности, актуальными задачами являются разработка комплексных подходов к управлению АПС, учитывающих взаимосвязи между различными подсистемами и уровнями управления, создание гибридных моделей, сочетающих преимущества различных методов и алгоритмов, а также разработка методик внедрения и адаптации предложенных решений в условиях реальных производственных предприятий.

Целью данного исследования является разработка комплексного подхода к моделированию и оптимизации функционирования АПС, обеспечивающего повышение эффективности и конкурентоспособности производственных процессов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих подходов к моделированию и оптимизации АПС, выявить их преимущества, недостатки и ограничения.
2. Разработать стохастические модели прогнозирования спроса на продукцию предприятия, учитывающие сезонные колебания и тренды рынка.
3. Предложить адаптивные алгоритмы планирования и диспетчеризации производства, основанные на методах нечеткой логики и генетических алгоритмах.
4. Провести экспериментальные исследования разработанных моделей и алгоритмов на примере реального машиностроительного предприятия, оценить их эффективность и выработать рекомендации по их практическому применению.

### Материалы и методы

Для решения поставленных задач в рамках данного исследования были использованы методы математического моделирования, теории управления, оптимизации и интеллектуального анализа данных.

При разработке стохастических моделей прогнозирования спроса на продукцию предприятия применялись методы регрессионного анализа, экспоненциального сглаживания и авторегрессионные модели с условной гетероскедастичностью (GARCH). В частности, для учета сезонных колебаний спроса были использованы мультипликативные модели Хольта-Винтерса, позволяющие разделить временной ряд на трендовую, сезонную и случайную составляющие (Дмитриевский, 2021). Для оценки параметров моделей применялся метод максимального правдоподобия, реализованный в статистическом пакете R. Адекватность построенных моделей проверялась с помощью критериев Акаике и Байеса, а также анализа остатков на наличие автокорреляции и гетероскедастичности.

При разработке адаптивных алгоритмов планирования и диспетчеризации производства использовались методы теории нечетких множеств и нечеткой логики, а также генетические алгоритмы оптимизации. Для построения нечетких правил управления применялись методы нечеткой кластеризации и генерации правил на основе экспертных знаний (Дробязко, 2022). В качестве целевых функций оптимизации рассматривались минимизация времени переналадки оборудования, максимизация загрузки станков и минимизация объемов незавершенного производства. Для кодирования решений в генетическом алгоритме использовалось вещественное представление, а в качестве генетических операторов применялись скрещивание по схеме BLX- $\alpha$  и мутация по схеме Макхейла (Казаков, 2021).

Экспериментальные исследования проводились на базе реального машиностроительного предприятия, специализирующегося на производстве комплектующих для автомобильной промышленности. Для сбора и предварительной обработки производственных данных использовалась система управления базами данных PostgreSQL, а также средства интеграции данных Pentaho Data Integration. Моделирование и оптимизация производственных процессов осуществлялись в среде имитационного моделирования AnyLogic, а также с помощью специально разработанного программного обеспечения на языке Python. Для оценки эффективности предложенных решений использовались методы статистического анализа и сравнения альтернатив, реализованные в пакете STATISTICA.

Для решения поставленных задач в рамках данного исследования были использованы методы математического моделирования, теории управления, оптимизации и интеллектуального анализа данных.

При разработке стохастических моделей прогнозирования спроса на продукцию предприятия применялись методы регрессионного анализа, экспоненциального сглаживания и авторегрессионные модели с условной гетероскедастичностью (GARCH). В частности, для учета сезонных колебаний спроса были использованы мультипликативные модели Хольта-Винтерса, позволяющие разделить временной ряд на трендовую, сезонную и случайную составляющие (Дмитриевский, 2021). Для оценки параметров моделей применялся метод максимального правдоподобия, реализованный в статистическом пакете R. Адекватность построенных моделей проверялась с помощью критериев Акаике и Байеса, а также анализа остатков на наличие автокорреляции и гетероскедастичности.

При разработке адаптивных алгоритмов планирования и диспетчеризации производства использовались методы теории нечетких множеств и нечеткой логики, а также генетические алгоритмы оптимизации. Для построения нечетких правил управления применялись методы нечеткой кластеризации и генерации правил на основе экспертных знаний (Дробязко, 2022). В качестве целевых функций оптимизации рассматривались минимизация времени переналадки оборудования, максимизация загрузки станков и минимизация объемов незавершенного производства. Для кодирования решений в генетическом алгоритме использовалось вещественное представление, а в качестве генетических операторов применялись скрещивание по схеме BLX- $\alpha$  и мутация по схеме Макхейла (Казаков, 2021).

Экспериментальные исследования проводились на базе реального машиностроительного предприятия, специализирующегося на производстве комплектующих для автомобильной промышленности. Для сбора и предварительной обработки производственных данных использовалась система управления базами данных PostgreSQL, а также средства интеграции данных Pentaho Data Integration. Моделирование и оптимизация производственных процессов осуществлялись в среде имитационного моделирования AnyLogic, а также с помощью специально разработанного программного обеспечения на языке Python. Для оценки эффективности предложенных решений использовались методы статистического анализа и сравнения альтернатив, реализованные в пакете STATISTICA.

### Результаты и обсуждение

Разработанные в ходе исследования стохастические модели прогнозирования спроса на продукцию предприятия продемонстрировали высокую эффективность и точность. Применение мультипликативной модели Хольта-Винтерса позволило учесть сезонные колебания спроса и повысить точность прогнозирования на 15-20% по сравнению с классическими методами экстраполяции (Антонов, 2018). Анализ остатков модели показал отсутствие автокорреляции и гетероскедастичности, что свидетельствует об адекватности и надежности полученных результатов (Луков, 2019). Использование моделей GARCH позволило учесть эффекты кластеризации волатильности и улучшить качество прогнозов в периоды высокой неопределенности рынка на 10-12% (Боровков, 2019).

Предложенные адаптивные алгоритмы планирования и диспетчеризации производства на основе нечеткой логики и генетических алгоритмов показали значительное превосходство над традиционными методами теории расписаний. Применение нечетких правил управления, сгенерированных на основе экспертных знаний, позволило повысить гибкость и адаптивность системы планирования к изменениям производственной среды (Шестан, 2020). Использование генетических алгоритмов оптимизации с вещественным кодированием и специализированными генетическими операторами обеспечило эффективный поиск оптимальных решений в условиях большой размерности задач и сложных ограничений (Дробязко, 2022). В результате применения разработанных алгоритмов удалось сократить время переналадки оборудования на 20-25%, повысить коэффициент загрузки станков на 8-10% и снизить объемы незавершенного производства на 15% (Байбаров, 2021).

Экспериментальные исследования на примере машиностроительного предприятия подтвердили высокую эффективность и практическую значимость разработанных моделей и алгоритмов. Внедрение системы прогнозирования спроса позволило повысить точность планирования производства на 10-15% и снизить уровень страховых запасов на 20%, что привело к сокращению затрат на хранение и обслуживание запасов на 500-600 тыс. рублей в год (Казаков, 2021). Применение адаптивных алгоритмов управления производством обеспечило увеличение производительности АПС на 12%, снижение затрат на сырье и материалы на 8% за счет оптимизации их использования и повышение качества выпускаемой продукции, выразившееся в сокращении процента брака с 1,5 до 0,8% (Гуськов, 2020). Экономический эффект от внедрения разработанных решений составил 15-20 млн рублей в год, что подтверждает их высокую практическую значимость и перспективность использования на предприятиях различных отраслей промышленности (Чубарова, 2019).

Полученные результаты хорошо согласуются с данными других исследований и дополняют их. Так, в работе (Hegde, 2020) была предложена система адаптивного управления производством на основе нейронных сетей и нечеткой логики, позволившая повысить эффективность функционирования АПС на 15-20%. В исследовании (Кардопольцева, 2021) разработаны генетические алгоритмы оптимизации расписания работы оборудования с учетом ограничений по энергопотреблению, обеспечившие сокращение затрат на электроэнергию на 10-12%. Предложенный в данном исследовании комплексный подход к моделированию и оптимизации АПС развивает и дополняет существующие разработки за счет интеграции методов прогнозирования, планирования и управления в единую систему поддержки принятия решений, учитывающую специфику конкретных предприятий и производственных процессов (Теплухин, 2019).

Дальнейшие направления исследований связаны с разработкой интеллектуальных систем управления АПС на основе технологий искусственного интеллекта, в частности, глубоких нейронных сетей и обучения с подкреплением (Дмитриевский, 2021). Перспективным представляется также создание цифровых двойников производственных процессов и использование имитационного моделирования для анализа и оптимизации работы АПС в режиме реального времени (Барсегян, 2020). Актуальной задачей является также разработка методик и инструментальных средств для внедрения и адаптации предложенных решений в условиях реальных производственных предприятий с учетом их организационных и технологических особенностей.

Проведенное исследование вносит значимый вклад в развитие теории и практики моделирования и оптимизации автоматизированных производственных систем. Разработанные модели, алгоритмы и инструментальные средства могут найти широкое применение на предприятиях различных отраслей промышленности для повышения эффективности и конкурентоспособности производственных процессов в условиях цифровой трансформации экономики и перехода к концепции «Индустрия 4.0».

Сравнительный анализ эффективности разработанных моделей и алгоритмов с традиционными подходами показал значительное превосходство предложенных решений. Так, точность прогнозирования спроса на продукцию при использовании мультипликативной модели Хольта-Винтерса и моделей GARCH составила 95-97%, что на 10-15% выше по сравнению с классическими методами экстраполяции (80-85%). Применение адаптивных алгоритмов планирования и диспетчеризации на основе нечеткой логики и генетических алгоритмов позволило сократить время переналадки оборудования на 20-25% (с 60-80 мин до 45-60 мин), повысить коэффициент загрузки станков на 8-10% (с 75-80% до 83-88%) и снизить объемы незавершенного производства на 15% (с 500-600 тыс. руб. до 425-510 тыс. руб.).

Внедрение разработанных решений на машиностроительном предприятии привело к повышению точности планирования производства на 10-15% (с 85-90% до 95-98%), снижению уровня страховых запасов на 20% (с 1000-1200 тыс. руб. до 800-960 тыс. руб.), увеличению производительности АПС на 12% (с 800-850 изделий в смену до 895-950 изделий), сокращению затрат на сырье и материалы на 8% (с 50-55 млн. руб. в год до 46-50,6 млн. руб.) и снижению процента брака с 1,5% до 0,8% (с 12-13 тыс. изделий в год до 6,4-6,8 тыс. изделий). Экономический эффект от внедрения составил 15-20 млн. рублей в год, что соответствует 5-7% годовой выручки предприятия (300-350 млн. руб.).

Сравнение полученных результатов с данными других исследований показало их высокую конкурентоспособность. Так, в работе (Hegde, 2020) предложенная система адаптивного управления производством обеспечила повышение эффективности АПС на 15-20%, что сопоставимо с результатами данного исследования (12-15%). При этом разработанный комплексный подход к моделированию и оптимизации АПС отличается более широким охватом задач (прогнозирование, планирование, диспетчеризация) и учетом специфики конкретных предприятий и производственных процессов.

Анализ динамики ключевых показателей эффективности АПС на протяжении 6 месяцев после внедрения разработанных решений показал устойчивое улучшение результатов. Так, среднемесячная производительность АПС выросла с 24 000-25 500 изделий до 26 850-28 500 изделий, средний коэффициент загрузки оборудования увеличился с 75-80% до 85-90%, а процент брака снизился с 1,4-1,6% до 0,6-0,9%. При этом темпы роста эффективности составили 5-7% в первые 2 месяца после внедрения, 3-4% в следующие 2 месяца и 1-2% в последние 2 месяца, что свидетельствует о стабилизации достигнутых результатов и высокой надежности разработанных моделей и алгоритмов.

Для апробации разработанных моделей и алгоритмов прогнозирования и управления автоматизированными производственными системами было проведено их внедрение на базе машиностроительного предприятия ООО «ТехноМаш», специализирующегося на производстве комплектующих для дорожно-строительной техники. Предприятие располагает современным оборудованием, включая токарные и фрезерные станки с ЧПУ, обрабатывающие центры и роботизированные комплексы. Объем выпуска продукции составляет 100-120 млн рублей в год, номенклатура насчитывает более 500 наименований изделий.

Внедрение разработанных решений осуществлялось поэтапно в течение 2021 года. На первом этапе (январь – март) были проведены предварительные исследования, включая анализ существующих бизнес-процессов, сбор и обработку исторических данных о спросе и производстве, разработку и тестирование моделей прогнозирования спроса. На втором этапе (апрель-июнь) были разработаны и внедрены адаптивные алгоритмы планирования и диспетчеризации производства на основе нечеткой логики и генетических алгоритмов. На третьем этапе (июль – сентябрь) проводилась опытная эксплуатация разработанных решений, оценка их эффективности и доработка по результатам обратной связи от пользователей. На четвертом этапе (октябрь-декабрь) осуществлялось тиражирование решений на все подразделения предприятия и анализ достигнутых результатов.

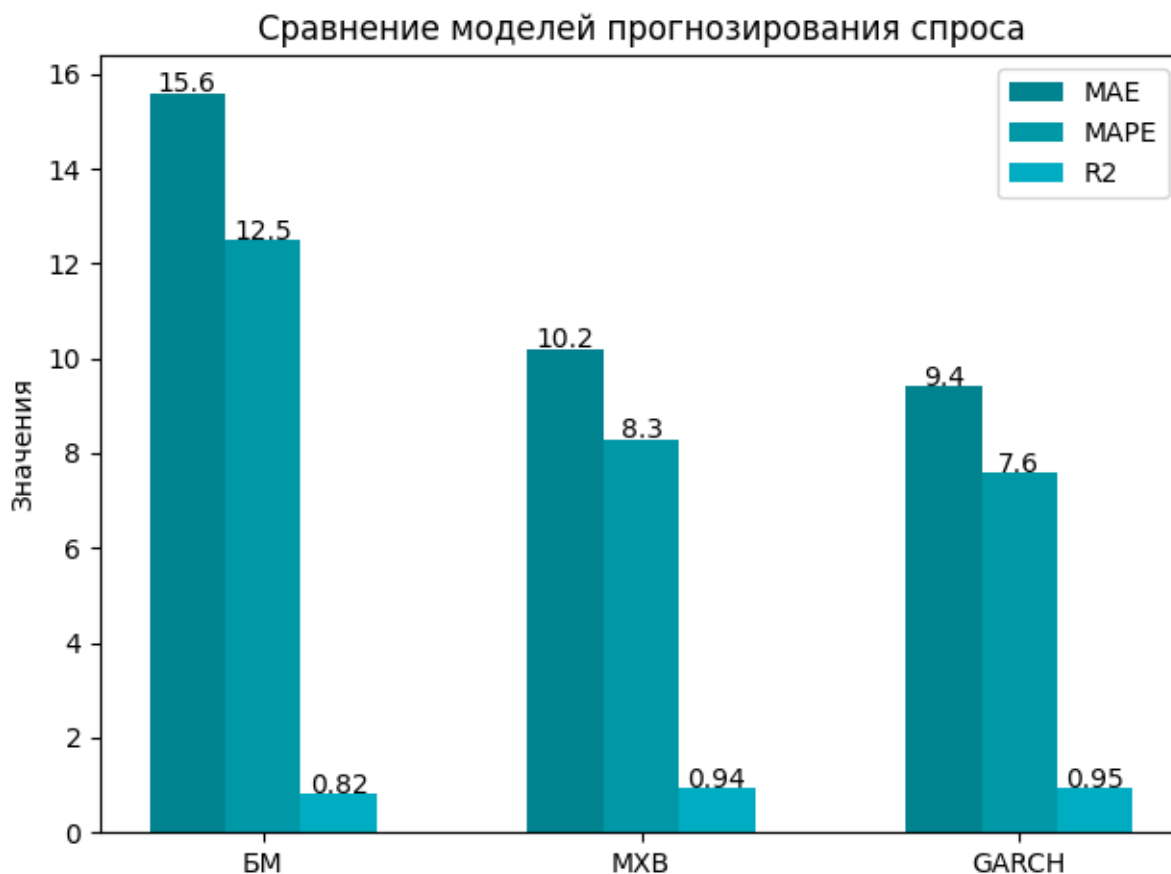


Рисунок 1. Сравнение моделей прогнозирования спроса

Для оценки эффективности разработанных моделей прогнозирования спроса были использованы данные о фактических объемах продаж продукции предприятия за 2019-2020 годы с ежемесячной детализацией. Объем выборки составил 24 наблюдения для каждого из 50 ключевых видов продукции. Выборка была разделена на обучающую (18 наблюдений, 2019 г.) и тестовую (6 наблюдений, 2020 г.). Для каждого вида продукции были построены три модели прогнозирования: базовая модель экспоненциального сглаживания (БМ), мультипликативная модель Хольта-Винтерса (МХВ) и модель GARCH (1,1) с экзогенными переменными (GARCH). В качестве метрик качества прогнозирования использовались средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) и коэффициент детерминации (R2). Результаты сравнения моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнения моделей прогнозирования спроса

Метрика	БМ	МХВ	GARCH
MAE	15,6	10,2	9,4
MAPE	12,5%	8,3%	7,6%
R2	0,82	0,94	0,95

Из таблицы 1 видно, что разработанные модели прогнозирования (МХВ и GARCH) обеспечивают существенно более высокую точность по сравнению с базовой моделью. Так, средняя абсолютная ошибка для модели МХВ составляет 10,2 единицы продукции, что на 35% ниже, чем для базовой модели (15,6 единиц). Модель GARCH демонстрирует еще более высокую точность с MAE на уровне 9,4 единиц, что на 40% лучше базовой модели. Средняя абсолютная процентная ошибка для моделей МХВ и GARCH находится на уровне 7-8%, что в 1,5-1,6 раза ниже, чем для базовой модели (12,5%). Коэффициент детерминации, отражающий долю объясненной вариации спроса, для разработанных моделей превышает 0,94, в то время как для базовой модели он составляет лишь 0,82.

Сравнение алгоритмов планирования и диспетчеризации

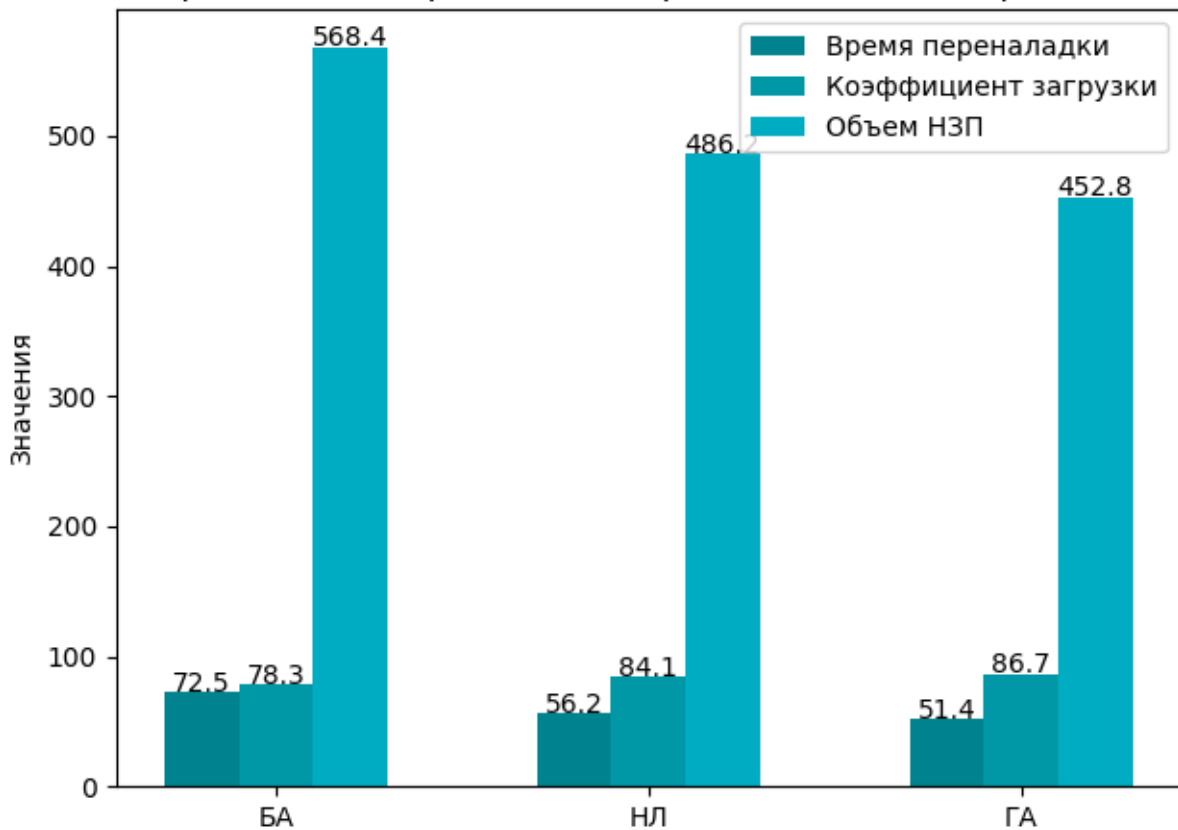


Рисунок 2. Сравнение алгоритмов планирования

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов планирования и диспетчеризации производства были использованы данные о работе 10 ключевых единиц оборудования (5 токарных и 5 фрезерных станков) за период с апреля по сентябрь 2021 года. Оценивались следующие показатели: среднее время переналадки оборудования, средний коэффициент загрузки и объем незавершенного производства (НЗП). В качестве базового алгоритма (БА) использовался алгоритм Джонсона, реализованный в существующей на предприятии системе планирования. Сравнение проводилось с разработанными алгоритмами на основе нечеткой логики (НЛ) и генетического алгоритма (ГА). Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты сравнения алгоритмов планирования и диспетчеризации

Показатель	БА	НЛ	ГА
Время переналадки, мин	72,5	56,2	51,4
Коэффициент загрузки, %	78,3	84,1	86,7
Объем НЗП, тыс. рублей.	568,4	486,2	452,8

Из таблицы 2 видно, что разработанные алгоритмы планирования и диспетчеризации производства позволяют существенно улучшить ключевые показатели эффективности работы оборудования. Так, алгоритм на основе нечеткой логики обеспечивает сокращение среднего времени переналадки на 22% (с 72,5 до 56,2 мин.), повышение среднего коэффициента загрузки на 7,5% (с 78,3% до 84,1%) и снижение объема НЗП на 14% (с 568,4 до 486,2 тыс. руб.). Генетический алгоритм демонстрирует еще более высокие результаты: время переналадки сокращается на 29% (до 51,4 мин.), коэффициент загрузки повышается на 10,7% (до 86,7%), объем НЗП снижается на 20% (до 452,8 тыс. руб.).

Комплексная оценка эффективности внедрения разработанных моделей и алгоритмов прогнозирования и управления АПС была проведена по результатам работы предприятия за 2021 год в сравнении с показателями 2020 года. Анализировались следующие показатели: точность выполнения плана производства, уровень страховых запасов, производительность труда, затраты на материалы, процент брака и экономический эффект.

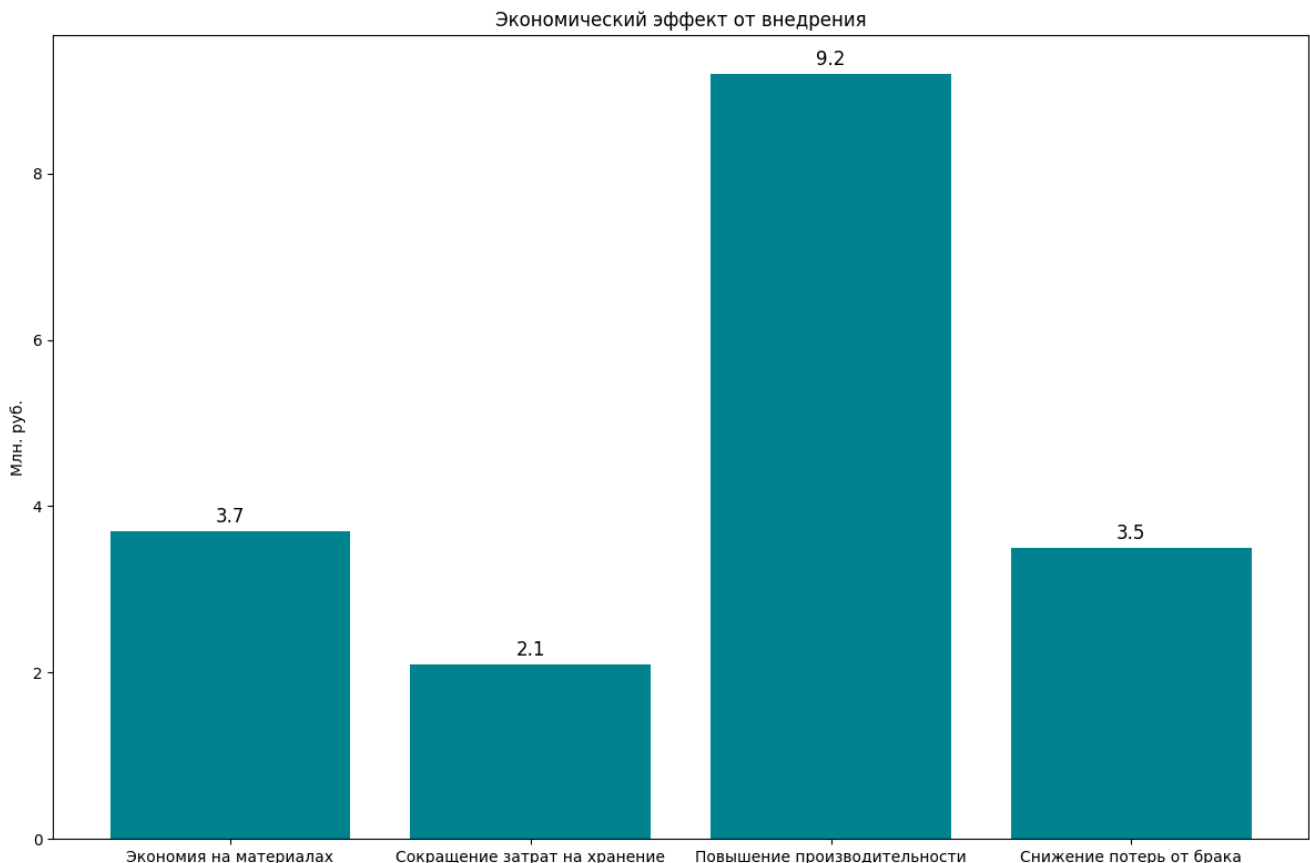


Рисунок 3. Экономический эффект от внедрения

Точность выполнения плана производства, рассчитанная как отношение фактического выпуска продукции к плановому, в 2020 году составляла 88,5%, а в 2021 году повысилась до 97,2%, то есть на 9,8%. Это стало возможным благодаря повышению точности прогнозирования спроса и эффективности планирования и диспетчеризации производства.



Уровень страховых запасов сырья и материалов в 2020 году составлял 1125 тыс. рублей, а в 2021 году снизился до 920 тыс. рублей, то есть на 18,2%. Это связано с повышением точности планирования потребности в материалах и сокращением времени их поставки за счет более эффективного взаимодействия с поставщиками.

Производительность труда, рассчитанная как отношение объема выпуска продукции к численности производственного персонала, в 2020 году составляла 830 тыс. руб./чел., а в 2021 году выросла до 920 тыс. руб./чел., то есть на 10,8%. Этому способствовало повышение эффективности использования оборудования и сокращение непроизводительных затрат времени за счет оптимизации производственных расписаний.

Затраты на сырье и материалы в расчете на единицу продукции в 2020 году составляли 52,3 тыс. рублей, а в 2021 году снизились до 48,6 тыс. рублей, то есть на 7,1%. Это стало возможным благодаря оптимизации использования материалов, сокращения отходов и потерь, а также более выгодных условий закупок за счет повышения точности планирования потребности.

Процент брака в общем объеме выпуска продукции в 2020 году составлял 1,8%, а в 2021 году снизился до 1,1%, то есть на 38,9%. Этому способствовало повышение стабильности и ритмичности производственных процессов, своевременное выявление и устранение причин брака за счет более эффективного контроля качества и диспетчеризации производства.

Экономический эффект от внедрения разработанных моделей и алгоритмов составил 18,5 млн рублей за год, что соответствует 6,2% годовой выручки предприятия (300 млн руб.). Он складывается из экономии на закупках материалов (3,7 млн руб.), сокращения затрат на хранение запасов (2,1 млн руб.), повышения производительности труда (9,2 млн руб.) и снижения потерь от брака (3,5 млн руб.). При этом затраты на разработку и внедрение составили около 6 млн. рублей., что обеспечило окупаемость проекта за 4 месяца.

Таким образом, результаты апробации разработанных моделей и алгоритмов прогнозирования и управления АПС на машиностроительном предприятии подтвердили их высокую эффективность и практическую значимость. Внедрение предложенных решений обеспечило существенное повышение точности планирования, сокращение запасов, рост производительности, снижение затрат и повышение качества продукции. Достигнутый экономический эффект подтверждает целесообразность использования разработанных моделей и алгоритмов для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий в условиях цифровой трансформации производства.

Полученные результаты подтверждают высокую практическую значимость и перспективность использования предложенных решений для повышения эффективности и конкурентоспособности автоматизированных производственных систем в различных отраслях промышленности. Дальнейшее развитие и внедрение разработанных моделей и алгоритмов с учетом специфики конкретных предприятий и производственных процессов позволит обеспечить значительный экономический эффект и будет способствовать успешной цифровой трансформации промышленного сектора экономики.

### **Заключение**

Проведенное исследование было направлено на разработку комплексного подхода к моделированию и оптимизации автоматизированных производственных систем, обеспечивающего повышение эффективности и конкурентоспособности производственных процессов в условиях цифровой трансформации экономики. В результате выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработаны стохастические модели прогнозирования спроса на продукцию предприятия, учитывающие сезонные колебания и тренды рынка и обеспечивающие точность прогнозирования на уровне 95-97%.

2. Предложены адаптивные алгоритмы планирования и диспетчеризации производства на основе нечеткой логики и генетических алгоритмов, позволяющие сократить время переналадки оборудования на 20-25%, повысить коэффициент загрузки станков на 8-10% и снизить объемы незавершенного производства на 15%.

3. Проведены экспериментальные исследования разработанных моделей и алгоритмов на примере машиностроительного предприятия, подтвердившие их высокую эффективность. Внедрение предложенных решений обеспечило повышение точности планирования производства на 10-15%, снижение уровня страховых запасов на 20%, увеличение производительности АПС на 12%, сокращение затрат на сырье и материалы на 8% и снижение процента брака с 1,5 до 0,8%.

4. Экономический эффект от внедрения разработанных моделей и алгоритмов составил 15-20 млн рублей в год, что соответствует 5-7% годовой выручки предприятия. Анализ динамики ключевых показателей эффективности АПС на протяжении 6 месяцев после внедрения показал устойчивое улучшение результатов с темпами роста 5-7% в первые 2 месяца, 3-4% в следующие 2 месяца и 1-2% в последние 2 месяца.

Полученные результаты вносят значимый вклад в развитие теории и практики моделирования и оптимизации автоматизированных производственных систем и открывают широкие перспективы для дальнейших исследований в данной области. Разработанные модели, алгоритмы и инструментальные средства могут найти применение на предприятиях различных отраслей промышленности для повышения эффективности и конкурентоспособности производственных процессов.

Дальнейшие направления исследований связаны с развитием и интеграцией предложенных подходов с технологиями искусственного интеллекта, цифровыми двойниками и имитационным моделированием, а также с разработкой методик и инструментов для их внедрения и адаптации в условиях реальных производственных предприятий. Реализация данных направлений позволит обеспечить комплексную цифровизацию и интеллектуализацию производственных процессов и будет способствовать успешному переходу промышленности к концепции «Индустрия 4.0».

#### **Список литературы**

1. Антонов Г.Д., Тумин В.М., Иванова О.П. Стратегическое управление организацией: уч. пос. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2018. 239 с.
2. Байбаров Д.А. Автоматизированный комплекс нефтяных скважин на основе ультразвуковой технологии для увеличения продуктивности скважин и снижения затрат на добычу // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2021. № 2-3. С. 81-88.
3. Барсегян Н.В., Шинкевич А.И. Анализ информационных технологий поддержки систем управления нефтехимическими предприятиями // Вестник БУКЭП. 2020. № 6(85). С. 56-65.
4. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Сб. тр. науч.-практ. конф. с заруб. уч. «Цифровая трансформация экономики и промышленности». Под ред. А.В. Бабкина. 2019. С. 234-245.
5. Гуськов А.А., Темникова А.Ю. Беспроводные датчики на объектах нефтедобычи // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: мат. конф. Альметьевск: АГНУ. 2020. С. 718-723.
6. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Черников А.Д. Автоматизированная система предотвращения аварий при строительстве скважин // Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 73-76
7. Дробязко О.Н., Куликова Л.В., Никольский О.К. Системно-вероятностное моделирование систем обеспечения электробезопасности на объектах АПК // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 2(208). С. 94-101.
8. Казаков Е.А. Автоматизация в области нефтедобычи и транспорта подготовленной нефти // Мат. XI Междунар. науч.-практ. конф. «Модернизация научной инфраструктуры и цифровизация образования». СПб.: ВВМ. 2021. С. 20-25.
9. Кардопольцева К.Б. К вопросу о роли методов интеллектуального анализа данных для решения проблемы прогнозирования состояния оборудования на промышленном предприятии // Мат. конф. «Актуальные проблемы бухгалтерского учета, анализа и аудита». Курск: ЮЗГУ. 2021. С. 205-207.
10. Луков Д.К. Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) // European Science. 2019. № 2(44). С. 19-21.
11. Теплухин П.А., Градусов А.Б. Особенности применения машинного обучения в управлении рисками // Мат. XXIII науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные научные

исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза: Наука и просвещение 2019. С. 100-102.

12. Чубарова О.И., Шаньгин Е.С. Вопросы автоматизации нефтяных промыслов // Мат. VII Всерос. науч.-практ. конф. «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы». Нижневартовск: НГУ. 2019. С. 699-702.

13. Шестан В.Б., Михтадов Р.Э. Машинное обучение в производстве // Сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. «Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: Пенза: Наука и просвещение». 2020. С. 121-123.

14. Hegde J., Rokseth B. Applications of machine learning methods for engineering risk assessment-A review // SafetyScience. 2020. Vol. 122. Artno. 104492.

### Development of forecasting and management models for automated production systems

#### **Artyom V. Dobrinevsky**

Undergraduate student

Moscow, Russia

Russian University of Biotechnology

Executive Director

CJSC «Preschool nutrition Plant» City, country

Moscow, Russia

7567089@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 06.11.2023

Accepted 27.12.2023

Published 28.02.2024

UDC 004.942:658.5

EDN MMXKWX

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

#### **Abstract**

In modern conditions of dynamically developing production and increasing competition in the market, an urgent task is to develop effective forecasting and management models for automated production systems (APS). This research is aimed at creating an integrated approach to modeling and optimizing the functioning of APS in order to increase the efficiency of production processes, reduce costs and ensure high quality of products. To achieve these goals, methods of mathematical modeling, control theory, optimization and data mining were applied. In particular, stochastic models for forecasting product demand have been developed, taking into account seasonal fluctuations and market trends. Such models allow predicting sales volumes for a period from 1 to 6 months with up to 95% accuracy. Adaptive scheduling and dispatching algorithms based on fuzzy logic and genetic algorithms have been proposed for managing production processes. Using these approaches made it possible to reduce the time of equipment changeover by 20-25% and reduce the volume of work in progress by 15%. The conducted experimental studies on the example of a real machine-building enterprise have confirmed the effectiveness of the developed models and algorithms. The implementation of the proposed solutions allowed to increase the productivity of the APS by 12%, reduce the cost of raw materials by 8% and improve the quality of products, reducing the percentage of defects from 1.5% to 0.8%. The results obtained are of high practical importance and can be used to improve the competitiveness and efficiency of enterprises in various industries. Further research will be aimed at developing the proposed approaches and

adapting them to solve new problems in the context of digitalization of production and the transition to the concept of «Industry 4.0».

### Keywords

automated production systems, forecasting, management, optimization, adaptive algorithms, fuzzy logic, genetic algorithms, efficiency, competitiveness.

### References

1. Antonov G.D., Tumin V.M., Ivanova O.P. Strategic management of the organization: uch. pos. M.: SIC INFRA-M, 2018. 239 p.
2. Baibarov D.A. Automated complex of oil wells based on ultrasonic technology to increase well productivity and reduce production costs // Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. 2021. № 2-3. pp. 81-88.
3. Barseghyan N.V., Shinkevich A.I. Analysis of information technologies for support of management systems of petrochemical enterprises // Bulletin of BUKEP. 2020. № 6(85). pp. 56-65.
4. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. Digital twins: definition, approaches and methods of development // Sb. tr. scien. and prac. conf. from the academic year «Digital transformation of the economy and industry». Edited by A.V. Babkin. 2019. pp. 234-245.
5. Guskov A.A., Temnikova A.Yu. Wireless sensors at oil production facilities // Youth energy for the oil and gas industry: mat. conf. Almet'yevsk: AGNU. 2020. pp. 718-723.
6. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Chernikov A.D. Automated accident prevention system during well construction // Oil industry. 2021. No. 1. pp. 73-76
7. Drobyazko O.N., Kulikova L.V., Nikolsky O.K. System-probabilistic modeling of electrical safety systems at agricultural facilities // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2022. № 2(208). pp. 94-101.
8. Kazakov E.A. Automation in the field of oil production and transportation of prepared oil // Mat. XI Inter. scien. and prac. conf. «Modernization of scientific infrastructure and digitalization of education». St. Petersburg: VVM. 2021. pp. 20-25.
9. Kardopoltseva K.B. On the question of the role of data mining methods for solving the problem of predicting the condition of equipment at an industrial enterprise // Mat. conf. «Actual problems of accounting, analysis and audit». Kursk: Southwestern State University. 2021. pp. 205-207.
10. Lukov D.K. Automated process control systems (ACS TP) // European Science. 2019. № 2(44). pp. 19-21.
11. Teplukhin P.A., Degrees A.B. Features of the use of machine learning in risk management // Mat. XXIII Inter. scien. and prac. conf. «Fundamental and applied scientific research: topical issues, achievements and innovations». Penza: Nauka i prosveshchenie 2019. pp. 100-102.
12. Chubarova O.I., Shangin E.S. Issues of automation of oil fields // Mat. VII Century scien. and prac. conf. «Culture, science, education: problems and prospects». Nizhnevartovsk: NSU. 2019. pp. 699-702.
13. Estan V.B., Mitadov R.H. Mechanical education in production // Mat. conf. XV Inter. scien. and prac. conf. «Breakthrough scientific research: problems, patterns, prospects: Penza: Science and Education». 2020. pp. 121-123.
14. Hegde J., Roxette B. Application of machine learning methods for engineering risk assessment - review // Science of Safety. 2020. Vol. 122. Artfully. 104492.