

На правах рукописи



Королев Сергей Андреевич

**МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА
ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОГО И СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА
СТОХАСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Сидельников Иван Дмитриевич

Кандидат технических наук, кандидат экономических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Антипов Дмитрий Вячеславович

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва», заведующий кафедрой «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении»

Решетников Игорь Станиславович

кандидат технических наук, ООО «Научно-производственное предприятие «Нефтегаз-софтсервис», технический директор

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится « » _____ 2026 года в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.18 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 7, ауд. 414ибм.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях многие машиностроительные предприятия, ведущие мелкосерийное производство наукоемкой продукции под заказ, столкнулись с повышенной неопределенностью спроса в разрезе отдельных заказов при общем росте потребности в выпускаемой продукции на уровне государства и одновременной необходимостью осваивать новые технологические процессы и выстраивать отношения с новыми поставщиками, а также нехваткой высококвалифицированных рабочих. Из-за чего для них возрастает значимость эффективного использования ограниченных ресурсов, которая может достигаться за счет совершенствования процессов планирования.

Причем адаптация производства к изменяющимся факторам в логистической цепочке как правило достигается за счет изменений на среднесрочном горизонте планирования, который обычно составляет 12-18 месяцев. Так происходит, поскольку динамичность внешней среды не позволяет строить производственные планы и проводить их математическую оптимизацию на стратегическом горизонте в 2-5 лет, а оперативное планирование фокусируется на отдельных этапах производственной цепочки, не позволяя оценить оптимальность и целесообразность производственной программы в целом.

Несмотря на это, среднесрочное планирование на практике остается менее изученной и автоматизированной областью по сравнению с краткосрочным планированием, для которого на многих предприятиях используются хорошо зарекомендовавшие себя системы классов MES (Manufacturing Execution System) и APS (Advanced Planning and Scheduling). А инструменты и подходы позволяющие учесть особенности мелкосерийного производства, связанные со стохастичностью производственных процессов из-за низкой повторяемости операций, являются еще более редкими. Причем в связи с массовым уходом зарубежных вендоров программного обеспечения с российского рынка, на текущий момент важна разработка именно отечественных инструментов автоматизированного планирования, позволяющих принимать решения в планировании в сжатые сроки, учитывая специфику стохастичности мелкосерийного производства и дифференцированное отношение к рискам различных заказов в нем.

Таким образом, разработка метода среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства, позволяющего комплексно, в рамках единой задачи оптимизации учитывать влияние стохастических факторов и принимаемый специфично для каждого заказа уровень риска, является актуальным способом повысить способность предприятий справляться с современными вызовами в области повышения эффективности производства в условиях неопределенности. Для соответствия данным требованиям метод должен включать инструмент для предиктивной аналитики стохастических факторов, модель оптимизации плана производства и алгоритм его формирования, а также автоматизированные формы отчетности о ключевых характеристиках плана, ускоряющие принятие решений на его основании.

Степень разработанности темы исследования. В современных отечественных научных трудах вопросы планирования производственной

деятельности машиностроительных предприятий рассматриваются Омельченко И.Н., Бром А.Е, Сидельниковым И.Д., Ставровским М.Е., Постниковой Е.С., Кушнareвым Л.И., Червяковым Л.М., Третьяковой В.А., Силинским В.С., Фоминым С.Г., Гавриловой Д.А, Бражниковой М.А., Типнер Л.М., Григорьевой М.Н., Перцевой А.А., Гариповой А.В. Вопросы математической оптимизации плана производства рассматривали Васильев В.А., Орлов А.И., Уздемир А.П., Шмелев В.В. Гасников А.В., Горяшко А.П., Гитман М.Б., Нырков Д.Е., Речкалов А.В., Ерохин Д.А. Среди зарубежных авторов, внесших важный вклад в рассматриваемую тематику, можно выделить П.Л. Хеммера (P.L. Hammer), П. Брукера (P. Brucker), П. Юржика (P. Jurik), Я. Блазевича (J. Blazewicz), С. Кримерса (S. Creemers), Д. Дюбуа (D. Dubois), Дж. Пака (J. Park).

Несмотря на высокий научный уровень и практическую значимость работ данных ученых, можно выделить одну из нерешенных задач в рассматриваемых областях – создание комплексного подхода, позволяющего учесть различное отношение к рискам нарушения контрактных обязательств для заказов и оптимизировать производство по всей цепочке с аналитически обоснованным подходом к учету стохастических факторов.

Цель работы – разработать метод среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства, учитывающий специфичные уровни принятия риска по каждому заказу и повышающий своевременность исполнения контрактных обязательств на основе предиктивного и сценарного анализа стохастических факторов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих проблем, методов и цифровых инструментов среднесрочного планирования машиностроительного производства.
2. Разработать метод среднесрочного планирования с выделением рисков и стохастических факторов, влияющих на принятие планировочных решений, и создать инструмент для предиктивного анализа их величин.
3. Построить математическую модель оптимизации плана производства с учетом стохастичности потребностей в ремонте оборудования, трудоемкости работ, различного уровня принятия риска несвоевременного исполнения контрактных обязательств по заказам, и имплементировать алгоритм формирования среднесрочного плана производства.
4. Разработать автоматизированные формы отчетности для проведения сценарного анализа планов производства.
5. Апробировать разработанный метод планирования производства, основанный на инструменте предиктивной аналитики, модели оптимизации и алгоритме планирования производства на АО «Петербургский тракторный завод».

Объект исследования – предприятие машиностроительной отрасли, ведущее мелкосерийное производство наукоемкой продукции в отраслях, специфика которых подразумевает необходимость значительных изменений выпускаемой продукции в рамках конкретного заказа.

Предмет исследования – методы и модели среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства.

Методология и методы исследования.

Проведенное исследование базируется на научных трудах из областей организации и планирования производства, теории вероятностей и математической статистике, математического аппарата оптимизации, алгоритмики и математической логики. Для решения поставленных в работе задач использовались анализ научных трудов по тематике исследования, методы математического и компьютерного моделирования, а также экспериментальное испытание разработок на базе промышленного предприятия.

Научная новизна проведенного исследования заключается в следующем:

1. Обоснована разработка метода сквозного среднесрочного планирования по всей производственной цепочке мелкосерийного производства, учитывающего стохастичность входных параметров, отличительной чертой которого является возможность учета различного уровня принятия риска по различным конкурирующим за производственные ресурсы заказам.

2. Разработан инструмент предиктивной аналитики стохастических факторов: интенсивности отказов и вытекающей из нее потребности в ремонтах производственного оборудования, трудоемкости работ и потребности в запасных частях для поддерживаемой продукции, позволяющий сократить риски внеплановых простоев оборудования и несвоевременного исполнения заказов.

3. Построена математическая модель, описывающая производственный процесс на среднесрочном горизонте планирования, содержащая лексикографически упорядоченные целевые функции и систему ограничений, сформулированных с учетом стохастичности. Новизна модели состоит в комплексном учете различного уровня принятия риска по заказам в рамках единой задачи оптимизации.

4. Предложен и имплементирован генетический алгоритм построения близкого к оптимальному плана производства, основанный на стохастической постановке задачи, описываемой в терминах вероятностных характеристик планируемых к исполнению работ, позволяющий формировать планы, повышающие загрузку производственных мощностей и персонала. В алгоритм заложена двухуровневость оптимизации, за счет которой достигается возможность оптимизировать план не только за счет отбора наилучшей последовательности выполнения работ, но и за счет оптимизации использования сверхурочной работы сотрудников для каждой анализируемой последовательности работ.

Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании теоретических основ планирования производства в условиях стохастичности производственных процессов мелкосерийного наукоемкого машиностроительного производства с учетом конкретизации рисков по каждому заказу.

Практическая ценность работы состоит в возможности внедрения разработанных инструмента предиктивной аналитики, модели и алгоритма среднесрочного планирования на предприятиях машиностроительного производства для формирования среднесрочных планов производства с учетом принимаемого специфично для каждого заказа допустимого уровня риска.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод сквозного среднесрочного планирования мелкосерийного производства, учитывающий стохастичность входных параметров и различный уровень принятия риска по отдельным заказам, позволяющий формировать план производства исходя из важности конкретных заказчиков для предприятия.
2. Инструмент предиктивной аналитики стохастических входных параметров планирования для формирования графика ремонтов с учетом уровней принятия рисков, оценки размаха вариации трудоемкостей заказов и параметров распределения потребностей в запасных частях.
3. Математическая модель оптимизации плана производства с лексикографически упорядоченными целевыми функциями, учитывающая стохастичность и допустимый уровень принятия риска, позволяющая алгоритмизировать формирование среднесрочного плана производства.
4. Двухуровневый генетический алгоритм оптимизации плана производства, основанный на стохастической постановке задачи среднесрочного планирования.
5. Автоматизированные формы отчетности для поддержки управленческих решений на основе проведения сценарного анализа по принятию заказов и выделению ресурсов для их выполнения.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует пунктам 23 «Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами» и 22 «Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков» паспорта специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертационного исследования обусловлены выбором научных трудов, на которых базируется исследование, использованными математическими методами, а также результатами экспериментального испытания разработок на базе АО «Петербургский тракторный завод» и АО «ПО Муроммашзавод».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: XLVI Академические чтения по космонавтике. Королевские чтения 2022. Москва, 25-28 января 2022 года. 15-я Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении», Москва, 1-3 ноября 2023. Результаты диссертационного исследования внедрены на АО «Петербургский тракторный завод» и АО «ПО Муроммашзавод». Реализация результатов диссертационного исследования подтверждена соответствующими актами внедрения.

Публикация результатов работы. По теме диссертационной работы опубликовано 8 научных работ. Общий объем – 4,64 п.л. (авторский вклад – 3,84 п.л.). Из них 5 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22. Также имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 162

наименований и приложения. Работа содержит 154 страницы основного машинописного текста, 30 рисунков, 18 таблиц. Общий объем работы 178 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи, а также вынесены основные положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы.

В Главе 1 «Анализ проблем планирования мелкосерийного машиностроительного производства» проведен анализ проблематики мелкосерийного машиностроительного производства и оценено влияние особенностей данного производства на процесс его среднесрочного планирования (Таблица 1).

Таблица 1.

Влияние особенностей мелкосерийного машиностроительного производства на процесс его планирования

Особенность	Фактор	Влияние на процесс среднесрочного планирования
Позаказный характер производства	Производство ведется в рамках принятых заказов	Планирование запасов на среднесрочном горизонте не требуется
	Поток заказов не всегда известен заранее	Модель планирования должна позволять анализировать исполнимость нового заказа
	Заказы имеют фиксированные сроки исполнения	Планирование должно оптимизироваться для своевременного исполнения заказов
	Для производства часто требуются уникальные комплектующие	На среднесрочный уровень планирования должны выноситься критичные закупки
Мелкосерийный тип производства	Один заказ выполняется продолжительное время	Необходимость дискретного планирования этапов выполнения производственных заказов
	Высокий коэффициент закрепления операций	Требуется планировать распределение ресурсов под производственные задания
	Переналадки являются неотъемлемой частью производственного процесса	При построении плана допустимо использовать прерывания для переключения с одного заказа на другой
	Высокий риск брака	Требуется закладывать резерв времени на устранение брака
Наукоемкость производства	Большая доля труднозаменимых высококвалифицированных рабочих	Необходимость учитывать затраты на удержание рабочих независимо от текущей загрузки производства
	Осуществление части работ по проектированию продукции после получения заказа	Наличие значимой неопределенности при оценке продолжительности работ

По результатам анализа установлено, что на текущий момент актуальна разработка отечественного метода планирования, учитывающего стохастичность мелкосерийного производства и интегрированного с инструментом предиктивной аналитики, так как существующие инструменты не позволяют учесть выявленные требования к планированию мелкосерийного машиностроительного производства. Это позволило сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

В Главе 2 «Постановка требований к построению среднесрочного плана мелкосерийного машиностроительного производства» проведен анализ существующих методов и моделей среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства и учета стохастичности в них, а также выделены митигируемые риски, границы решений, принимаемых с помощью метода среднесрочного планирования, и сценарии его использования. Показано, что процесс среднесрочного планирования должен помогать снижать вероятность реализации следующих групп рисков:

- организационно-управленческих, связанных с неисполнением контрактных обязательств, несогласованностью целей подразделений и нехваткой квалифицированной рабочей силы;
- технологических, связанных с несоответствием производственных мощностей поступающим заказам и избыточной неравномерностью загрузки оборудования и производственного персонала;
- технических, связанных с частотой возникновения внеплановых отказов производственного оборудования.

Выполненный анализ существующих методов и моделей среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства показал, что они не полностью соответствуют выявленным требованиям по снижению рисков, а также требованиям, обусловленным спецификой среднесрочного горизонта планирования. Среди рассмотренных подходов к учету стохастичности при планировании, наиболее подходящим для исследуемого производства признан подход, находящий оптимум при условии попадания решения в некоторую область с заданной вероятностью, однако он должен быть доработан с тем, чтобы учитывать различную степень принимаемого риска в различных заказах на основе предиктивного анализа стохастических факторов.

На основании сформулированных требований, решения, принимаемые касательно производства, были разделены на три уровня по вариативности в модели среднесрочного планирования (Таблица 2).

Таблица 2.

Границы процесса среднесрочного планирования производства

Переменные оптимизационной задачи	Переменные, изменяемые в рамках сценарного моделирования	Факторы, не изменяемые в рамках системы среднесрочного планирования производства
- Время начала выполнения конкретной работы и ее разбивка на стадии - Выделение и загрузка трудовых ресурсов, используемых для выполнения конкретной работы	- Принятие заказов на выпуск продукции - Фиксируемые сроки выпуска заказанной продукции - Штрафы за несвоевременное исполнение контрактных обязательств - Прогнозы закупочных возможностей - Заключение контрактов с новыми поставщиками	- Технология производства продукции - Страховые запасы - Нормативы остатков запасных частей для продукции на поддержке - Взаиморасчеты с заказчиками - Программа НИОКР - Входящая и исходящая логистика - Ценовая политика

Таблица 2 – окончание

	- План ремонтов - Численность производственных рабочих	- Ассортимент продукции - Инвестиции в развитие производства - Система оплаты и мотивации труда
--	---	---

После определения границ задачи были также определены и описаны основные сценарии использования метода среднесрочного планирования:

1. Подготовка и загрузка данных для построения плана производства и его построение с помощью оптимизационного алгоритма.
2. Подготовка данных с фиксацией некоторых решений планирования и оптимизация плана для оставшейся части работ.
3. Анализ полученных результатов планирования.

В Главе 3 «Разработка метода среднесрочного планирования мелкосерийного машиностроительного производства» проведено разделение входных параметров планирования по степени стохастичности и указано как инструменты и модели, используемые при планировании, должны сочетаться между собой (Рис. 1).



Рис. 1. Структура метода планирования

Для оценки факторов с выраженной стохастичностью, выделенных полужирным шрифтом на рисунке выше, разработан инструмент предиктивной аналитики на

основе обобщенных аддитивных моделей местоположения, масштаба и формы (GAMLSS). В нем используются модели, на основании ковариат (X) из Таблицы 3 предсказывающие распределение стохастических параметров оптимизационной задачи (Y), по принципу $X \rightarrow F(Y|X)$, что позволяет гибко варьировать принимаемую степень риска на этапе планирования.

Таблица 3.

Ковариаты в предиктивном анализе стохастических факторов

Y	Интенсивность отказов эксплуатируемой продукции	Трудоемкость работ	Интенсивность отказов оборудования
X	- Средний возраст парка эксплуатируемой техники - Размер парка эксплуатируемой техники - Количество факторов негативно влияющих на жесткость условий эксплуатации	- Количество производственных операций, выполняемых для исполнения работы - Количество изменений, вносимых в конструкцию выпускаемой продукции, относящихся к конкретной работе - Количество ранее выпущенных единиц продукции заказанного вида - Средний разряд рабочих производственного подразделения - Средний срок эксплуатации оборудования	- Признак ремонта проведенного по фактическому состоянию оборудования - Производственное подразделение, в котором производится ремонт - Количество единиц основного технологического оборудования в подразделении, в котором производится ремонт - Средний фактический срок эксплуатации оборудования

Затем была сформулирована математическая модель оптимизации плана производства, учитывающая стохастичность в формате вероятностных характеристик и позволяющая устанавливать разный допустимый уровень риска несвоевременности исполнения контрактных обязательств для различных заказов. Была выработана система лексикографически упорядоченных целевых функций, первая из которых направлена на наиболее своевременное исполнение контрактных обязательств, а вторая на максимизацию ожидаемого финансового результата.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i: e_i \neq \emptyset} \left(\text{Max} \left((m_{i,z_i}^{\max} + d_{i,z_i}^{\max} - e_i) \cdot f_i, 0 \right) \middle| P(d \in \mathcal{D}(\xi)) \geq 1 - \epsilon_i \right) \rightarrow \min \\
 & \mathbb{E} \left[\sum_{i: e_i \neq \emptyset} \left(p_i - b_i \cdot \mathbb{I}(m_{i,z_i}^{\max} + d_{i,z_i}^{\max} \leq e_i) \right) - \sum_i h_i \right. \\
 & \quad - \sum_l \left(\max_i (m_{i,z_i}^{\max} + d_{i,z_i}^{\max}) - t_0 \right) \cdot s_l \\
 & \quad - \sum_l \left(\sum_{i \in \mathcal{L}_{l,z}} \text{Max} \left((r_{i,z} - r_l^{\text{norm}}) \cdot d_{i,z}, 0 \right) \right) \cdot s_l^{\text{ot}} \\
 & \quad \left. - \sum_{i: e_i \neq \emptyset} \left(\text{Max} \left((m_{i,z_i}^{\max} + d_{i,z_i}^{\max} - e_i) \cdot f_i, 0 \right) \right) \right] \rightarrow \max
 \end{aligned}$$

Помимо системы целевых функций, постановка оптимизационной задачи включает систему ограничений. Ограничения, отражающие технологические и организационные особенности, включают: ограничения предшествования работ, необходимости переналадок и доступности критичных ресурсов, возможности одновременного выполнения только одной работы в цеху, не превышения допустимой загрузки персонала и требование соблюдать зафиксированные планировочные решения.

$$\begin{cases} m_{k,1} \geq \text{Max}(m_{i,z_i}^{\max} + d_{i,z_i}^{\max} + c_{ik}, m_k^{\text{early}}), \forall (i,k) \in E \\ m_{k,j} \geq m_{i,z} + d_{i,z} + c_{ik}, \forall l, \forall ((i,z), (k,j)) \in T \\ \sum_{i \in \mathcal{L}_{l,z}} \mathbb{I}[(m_{i,z} < \tau) \cap (m_{i,z} + d_{i,z} > \tau)] \leq 1, \forall l, \forall \tau \\ \sum_{i \in \mathcal{L}_{l,z}} r_{i,z} \leq r_l^{\max}, \forall t, \forall l \\ m_{i,1} = m_{i,z_i}^{\max} = m_i^{\text{fix}}, \forall i: m_i^{\text{fix}} \neq \emptyset \end{cases}$$

Ограничения, отражающие физическую сущность переменных, включают: невозможность запанировать работу раньше начала горизонта планирования; требование, что число стадий, на которое разбивается работа, должно быть натуральным, и что каждая стадия должна иметь положительную продолжительность и выполняться с задействованием положительного объема трудовых ресурсов; ограничение, что стадии работы не могут выполняться параллельно.

$$\begin{cases} m_{i,z} \geq t_0, \forall i, \forall z \\ z_i^{\max} \in N, \forall i \\ d_{i,z} > 0, \forall i, \forall z \\ r_{i,z} > 0, \forall i, \forall z \\ m_{i,z} + d_{i,z} < m_{i,z+1}, \forall i, \forall z \setminus z_i^{\max} \end{cases}$$

где Max – оператор выбора наибольшего значения;

$m_{i,z_i}^{\max}$ – время начала выполнения последней стадии i -ой работы;

$z_i^{\max}$ – количество стадий, на которое разбивается выполнение i -ой работы;

$d_{i,z_i}^{\max}$ – длительность последней стадии выполнения i -ой работы, дн.;

e_i – директивный срок окончания i -ой работы;

f_i – штраф в единицу времени за просрочку момента исполнения контрактных обязательств, руб. / дн.;

d – вектор продолжительностей работ;

ξ – вектор неопределенных параметров работ;

$\mathcal{D}(\xi)$ – подмножество продолжительностей работ, для которого левая часть выражения принимает значение не хуже текущего;

ϵ_i – уровень принятия риска по заказу, на исполнение которого направлена i -ая работа, доля;

p_i – выручка от исполнения заказа, завершаемого i -ой работой, руб.;

b_i – бонусное вознаграждение работников, выплачиваемое при своевременном выполнении заказа, завершаемого i -ой работой, руб.;

h_i – затраты на материалы и комплектующие для i -ой работы, руб.;
 t_0 – момент начала отсчета времени в оптимизационной задаче;
 s_l – фиксированная базовая часть вознаграждения работников на рабочем месте (в цеху) l , руб. / дн.;
 $\mathcal{L}_l$ – множество работ, выполняемых на рабочем месте (в цеху) l ;
 $r_{i,z}$ – объем трудовых ресурсов, выделенных на выполнение z -ой стадии i -ой работы, чел.;
 r_l^{norm} – номинально доступная рабочая сила на рабочем месте (в цеху) l , чел.;
 s_l^{ot} – стоимость дополнительной единицы рабочего времени рабочих на рабочем месте (в цеху) l , руб. / чел.-дн.
 c_{ik} – продолжительность переналадки с i -ой работы на k -ую, дн.;
 m_k^{early} – наиболее ранний возможный срок поставки комплектующих, критичных для выполнения k -ой работы;
 $\mathcal{E}$ – множество дуг, задающих отношения предшествования между работами;
 $\mathcal{T}$ – множество дуг, задающих отношения предшествования между стадиями работ, выполняющихся на одном рабочем месте (в цеху);
 τ – произвольный момент времени в течение горизонта планирования;
 r_l^{max} – максимально доступная рабочая сила на рабочем месте (в цеху) l , чел.

На основании построенной математической модели оптимизации среднесрочного плана производства, был разработан двухуровневый генетический алгоритм, с отдельно выполняемой оптимизацией выделения трудовых ресурсов и соотношения трудоемкостей стадий работ для каждого рассматриваемого варианта последовательности выполнения работ и их разбивки на стадии (Рис. 2).

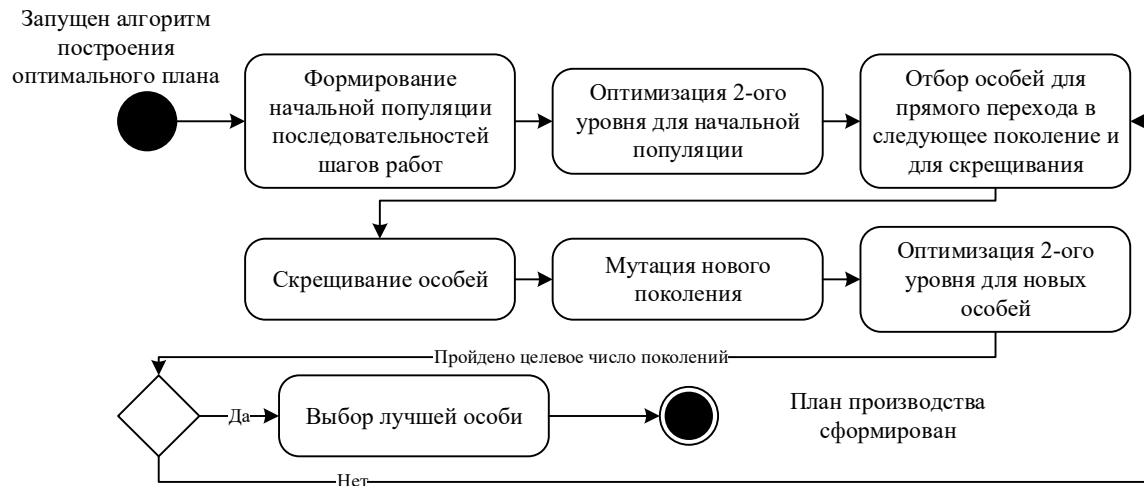


Рис. 2. Структура алгоритма оптимизации плана производства

Программная имплементация разработанного алгоритма в диссертации выполнялась на языке Python в парадигме объектно-ориентированного программирования. Классом верхнего уровня в предлагаемом алгоритме является класс *Optimizer*, в котором реализованы методы, отвечающие за математическую оптимизацию плана производства, а также вспомогательные методы для функционирования системы планирования. В методах данного класса совершаются операции над экземплярами класса *ProductionPlan* которые представляют собой формализованные планы производства. Класс планов производства

декомпозируется на дочерние классы, отражающие важные сущности производственной цепочки, необходимые для введения в модель ограничений либо компонентов целевой функции (Рис. 3).

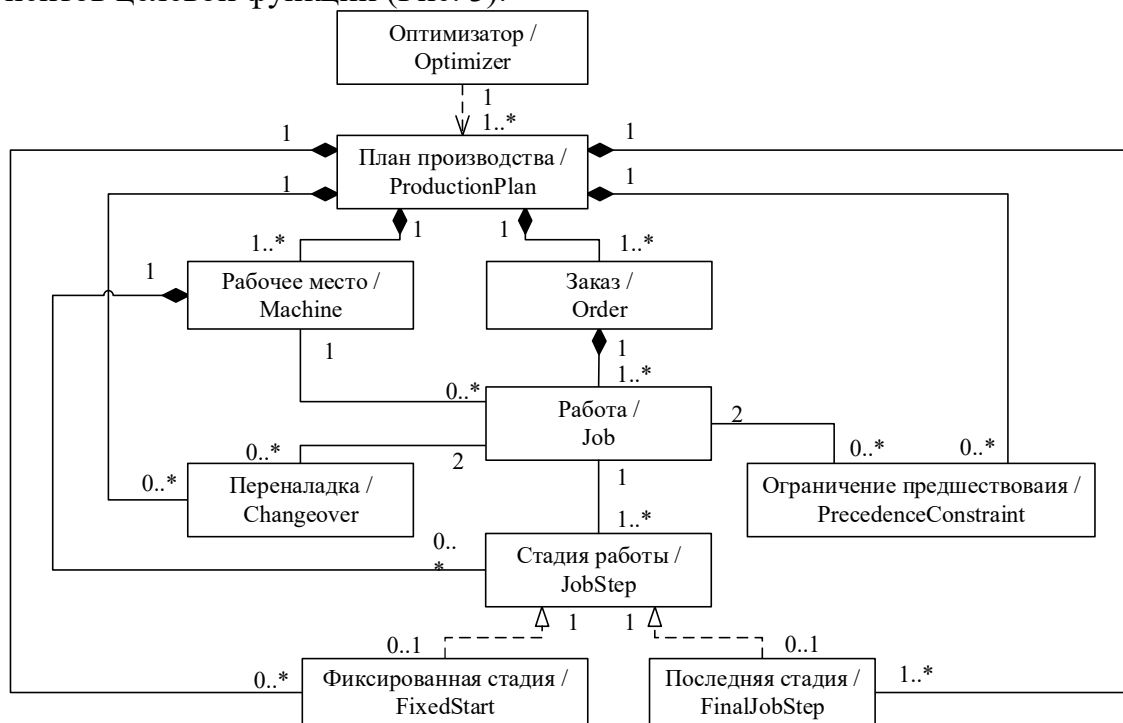


Рис. 3. Структура алгоритма оптимизации плана производства

Написанный программный код зарегистрирован в Роспатенте как программа для ЭВМ. Благодаря своим характеристикам, имплементированный алгоритм является эффективным инструментом автоматизации планирования, и может лечь в основу передовой отечественной системы среднесрочного планирования машиностроительного производства под заказ.

В Главе 4 «Внедрение и оценка эффективности разработанного метода планирования» автоматизируется формирование отчетности по мерам эффективности плана для упрощения проведения сценарного анализа планов, а также проводится апробация разработанного метода планирования производства, включающего инструмент предиктивной аналитики, модель оптимизации и алгоритм формирования плана.

Разработан VI-отчет, содержащий автоматизированные формы отчетности с ключевыми характеристиками полученного плана и исходных данных в разрезах, удобных для анализа пользователем. Пример формируемых форм отчетности представлен ниже (Рис. 4).

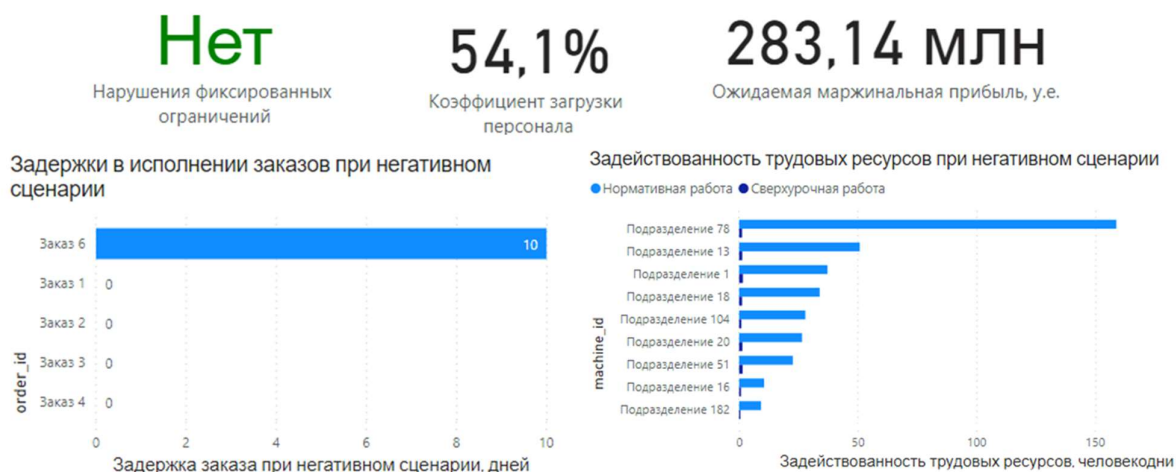


Рис. 4. Пример форм отчетности по плану

Данный отчет сокращает время необходимое для анализа формируемых планов и принятия решений по выбору оптимального сценария для управляемых переменных факторов внутренней среды предприятия. Для обеспечения удобства пользования и ускорения принятия решений на основании данного отчета при его разработке были применены следующие принципы, составляющие подход к формированию автоматизированных форм отчетности по плану:

- формирование в комплексной структуре, позволяющей анализировать план от ключевых показателей эффективности до детализированных срезов по цехам, загрузке персонала и экономическим результатам с учетом неопределенности;
- применение типа визуализаций, позволяющих максимально быстро считывать информацию и выделять ключевые показатели и проблемы;
- сочетание точечных оценок ключевых мер эффективности плана с оценками распределений ожидаемых результатов с учетом стохастичности, позволяющее быстро оценивать как эффективность, так и риски принятия плана.

Проведена апробация метода планирования на данных о производственном процессе и заказах опытно-конструкторского участка АО «Петербургский тракторный завод», ведущего мелкосерийное производство на заказ. Данное предприятие производит как типовую сельхозтехнику, так и мелкосерийную спецтехнику в том числе для муниципальных нужд, поэтому обладает выраженно различающимися приоритетами по выполнению заказов. При апробации использовался набор данных для планирования, содержащий:

- 8 заказов, 1 особо критичный и 7 типовых;
- 12 подразделений, задействованных в выпуске продукции;
- 158 работ, необходимых для исполнения заказов;
- 5392 вариантов переналадок между работами с их трудоемкостью;
- 146 технологических ограничений последовательности выполнения работ;

А также статистические данные о ремонтах оборудования, трудоемкости работ и отказах продукции, необходимые для обучения и апробации моделей предиктивной аналитики. По результатам апробации установлено, что разработанный инструмент предиктивной аналитики позволяет выявлять и экстраполировать

зависимости в стохастических факторах, показанных на Рис. 5, 6, 7, где × обозначает наблюдение, а его цвет код подразделения для Рис. 5 и 6, и код узла для Рис. 7.

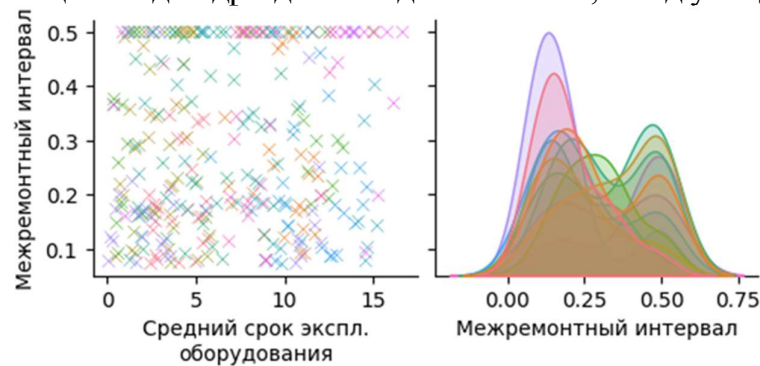


Рис. 5. Ключевые факторы, влияющие на ремонты оборудования

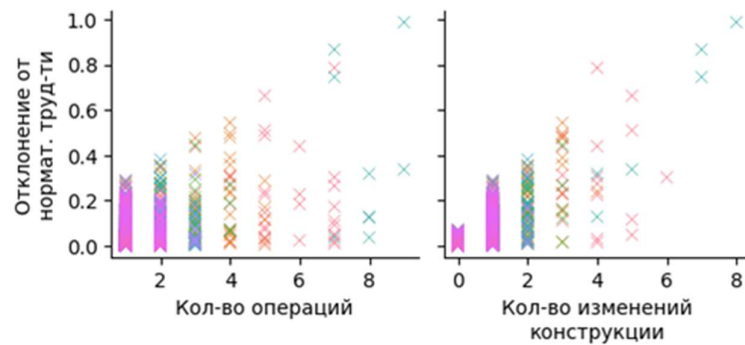


Рис. 6. Ключевые факторы, влияющие на трудоемкость работ

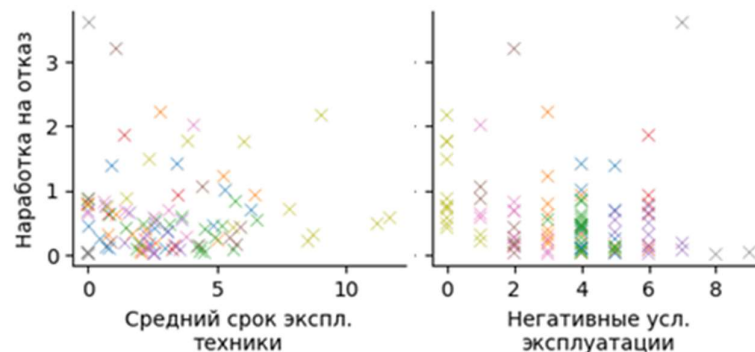


Рис. 7. Ключевые факторы, влияющие на потребность в запасных частях

Среди факторов, влияющих на потребность в ремонтах оборудования (Рис. 5), визуально можно заметить зависимости распределений межремонтных интервалов от производственных подразделений, а также незначительное превалирование длительных межремонтных интервалов для подразделений с низким средним сроком эксплуатации оборудования. Во влиянии на трудоемкость работ (Рис. 6) можно отметить рост отклонений от нормативной трудоемкости для работ состоящих из большого количества операций и предполагающих большее количество изменений конструкции. Наработка на отказ (Рис. 7), определяющая потребность в запасных частях для поддерживаемой продукции, сокращается с увеличением срока эксплуатации и ростом числа негативных факторов в условиях эксплуатации. При этом благодаря разработанному инструменту предиктивной аналитики, на основании приведенной статистики удастся формировать графики ремонтов, позволяющие сократить

внеплановые простои более чем на 25% при сохранении общей планируемой продолжительности ремонтных работ. А также строить ожидаемые распределения трудоемкости работ и потребности в запасных частях с учетом ковариат, чтобы планировать производство с учетом принимаемых специфично для отдельных заказов уровней риска.

В рамках апробации также показано, что применение разработанного метода планирования позволяет повысить загрузку производственных мощностей на 5%, при сохранении равномерности загруженности персонала на приемлемом для предприятия уровне, и повысить экономическую эффективность производства и исполнения заказов на 4,5%, по сравнению с лучшим из альтернативных, применяющихся на предприятии алгоритмов планирования (Таблица 4).

Таблица 4.

Повышение эффективности формируемых планов

Мера эффективности	Лучший из текущих алгоритмов планирования	Разработанный метод планирования
Снижение коэффициента технической готовности из-за внеплановых ремонтов	0,65%	0,47% (-27,5%)
Процент загруженного времени	32,1%	33,8% (5%)
Время выпуска, р.д.	237	226 (-4,6%)
Равномерность загрузки персонала	56,3%	54,1% (-3,9%)
Целевая функция первого уровня, млн. у.е.	3,19	1,37 (-57,1%)
Ожидаемый финансовый результат, млн. у.е.	270,6	283,1 (4,6%)

При этом, помимо эффективности плана и снижения внеплановых простоев, разработанный метод привносит значительные изменения в процесс планирования, позволяя сократить существующий цикл планирования с рабочей недели до 1-2 рабочих дней. Сокращение достигается за счет автоматизации ручных действий, что также позволяет снизить критичность зависимости от квалификации специалиста по планированию.

Направлением дальнейших исследований по проблематике диссертации может служить разработка механизмов оперативной корректировки среднесрочных планов в реальном времени с учетом изменения внешних условий и конкретных реализаций стохастических факторов, влияющих на производственные процессы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведенный анализ специфики мелкосерийного машиностроительного производства показал, что оно характеризуется значительными изменениями продукции под нужды конкретного заказчика, длительными производственными циклами, и необходимостью задействовать высококвалифицированных рабочих, на рынке труда которых наблюдается дефицит. Эти факторы требуют вести среднесрочное планирование с дискретным учетом работ, принимая во внимание стохастичность их трудоемкости и различный допустимый уровень риска несвоевременности исполнения заказов, что не в полной мере учтено в популярных цифровых инструментах и теоретических подходах к среднесрочному планированию, поэтому требуется разработка метода планирования способного их учесть.

2. Выполненное исследование митигируемых рисков, решений, принимаемых с помощью метода среднесрочного планирования, и основных сценариев его использования позволило ограничить рамки разрабатываемого метода. Среди факторов, влияющих на планирование, были выделены обладающие выраженной стохастичностью: интенсивность отказов эксплуатируемого оборудования, трудоемкость работ и интенсивность отказов эксплуатируемой продукции. Для оценки их величин на основе обобщенных аддитивных моделей местоположения, масштаба и формы (GAMLSS) разработан инструмент предиктивной аналитики, позволяющий формировать график ремонтов исходя из принимаемого уровня риска и оценивать параметры распределений трудоемкостей работ и потребности в запасных частях, обеспечивающий корректный учет стохастичности при планировании.

3. Построена математическая модель оптимизации плана производства на среднесрочном горизонте с учетом различного уровня принятия риска по отдельным заказам, рассматривающая стохастичность в формате вероятностных характеристик планируемых процессов, с лексикографически упорядоченными целевыми функциями, отдающими приоритет наиболее своевременному исполнению заказов над достижением максимальных экономических результатов на среднесрочном горизонте. Для нее разработан двухуровневый генетический алгоритм формирования плана производства, позволяющий оптимизировать план не только отбирая наилучшую последовательность выполнения работ, но и оптимизируя использование сверхурочной работы сотрудников для каждой анализируемой последовательности работ.

4. Разработан инструмент формирования автоматизированных форм отчетности, отражающих эффективность плана с точки зрения своевременности исполнения контрактных обязательств, загрузки персонала и экономических результатов в разрезах производственных подразделений, заказов и запланированных работ, позволяющий комплексно оценивать построенный план и сокращающий время, необходимое для сценарного анализа формируемых планов и принятия решений по выбору оптимального сценария управляемых факторов.

5. Разработанный метод планирования, включающий инструмент предиктивной аналитики, модель и алгоритм планирования мелкосерийного машиностроительного производства, прошел апробацию на АО «Петербургский тракторный завод». По результатам апробации ожидается, что его внедрение поможет снизить внеплановые простои оборудования на величину до 25% и повысить загруженность производственных мощностей и рабочих на величины до 5%, а экономическую эффективность производства на величины до 4,5% по сравнению с использованием стандартных алгоритмов планирования производства. А также за счет автоматизации ручных операций сократить длительность цикла среднесрочного планирования с рабочей недели до 1-2 дней.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22

1. Бром А.Е., Королев С.А. Разработка алгоритма линейаризации оптимизационной задачи планирования производственной программы // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №11 (125). С. 79-82. (0,7 п.л. / 0,45 п.л.).

2. Бром А.Е., Королев С.А. Разработка подхода к среднесрочному объёмно-календарному планированию производства на основе метода скользящих окон // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76, № 3. С. 114-119. (0,7 п.л. / 0,45 п.л.).
3. Королев С.А. Требования к процессу среднесрочного планирования производства в сфере общего машиностроения // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 1(139). С. 26-30. (0,58 п.л.).
4. Королев С.А. Разработка подхода к среднесрочному планированию позаказного производства машиностроительного предприятия // Компетентность. 2024. № 3. С. 37-41. (0,58 п.л.).
5. Королев С.А. Предиктивная аналитика стохастических факторов при среднесрочном планировании производства // Компетентность. 2026. № 1. С.38-43. (0,7 п.л.).

Публикации в других изданиях

6. Королев С.А., Бром А.Е. Теория расписаний и интервальное планирование в условиях позаказного производства // XLVI Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах. М.: 2022. Т. 2. С. 71-75. (0,41 п.л. / 0,25 п.л.).
7. Королев С.А. Генерация признаков в задаче предсказания характеристик стали после продувки // Наука, технологии и бизнес 2022: Материалы IV Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, Москва, 27–28 апреля 2022 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – С. 261-268. (0,65 п.л.).
8. Королев С.А., Сидельников И.Д. Критерии оптимизации в задаче среднесрочного планирования производства продукции гражданского и специального назначения // Наукоемкие технологии в машиностроении. Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Москва: 2024. Т. 2. С. 319-322. (0,33 п.л. / 0,18 п.л.).

Свидетельства на программы для ЭВМ

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024686013. Российская Федерация. Программа для формирования среднесрочного плана позаказного машиностроительного производства с учетом различного принимаемого уровня риска несвоевременного исполнения отдельных заказов / заявлено 24.10.2024; опубликовано 05.11.2024; автор Королев С.А.; правообладатель Королев С.А.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025665563. Российская Федерация. Программа для предиктивной оценки стохастических входных параметров среднесрочного плана позаказного производства / заявлено 30.05.2025; опубликовано 18.06.2025; авторы Королев С.А., Сидельников И.Д., Бром А.Е.; правообладатели Королев С.А., Сидельников И.Д., Бром А.Е.