



На правах рукописи

Поляков Андрей Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНА РАБОТЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И
МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 2.5.22. Управление качеством продукции.

Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Диссертация выполнена в автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» им. академика В. П. Ефремова»

Научный руководитель:

Бром Алла Ефимовна

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Киселев Эдуард Валентинович

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный

авиационный технический университет

имени П.А. Соловьева»,

заведующий кафедрой организации

производства и управления качеством

Хаймович Ирина Николаевна

доктор технических наук, профессор

ФГАОУ ВО «Самарский национальный

исследовательский университет имени

академика С.П. Королева»,

профессор кафедры обработки металлов давлением

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт машиноведения им.

А.А. Благоднарова Российской академии наук

Защита состоится _____ 2026 г. 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.414 ибм.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных 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,
кандидат технических наук, доцент

Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

На фоне международных санкций и ужесточения требований к качеству и срокам выпуска продукции, необходимо выявить перспективы и возможности улучшения интенсивного использования производственных мощностей.

Проблема поиска и мобилизации внутренних резервов производственных мощностей охватывает многие аспекты: это минимизация непродуктивных простоев и обеспечение надежности и работоспособности оборудования, сокращение незавершенного производства и длительности технологического цикла, увеличение производительности труда и организация внутри и меж цеховой кооперации. Решения вышеперечисленной проблематики лежат в области оперативного планирования – от соответствия расчетов фактической загрузки на производстве и возможности оперативной корректировки во многом зависит повышение интенсивности использования производственных мощностей и выполнение заказов в срок.

Но в условиях единичного и мелкосерийного производства оперативное планирование загрузки производственных мощностей технологических центров должно учитывать противоречия, возникающие между требованием выполнения плана по валовому выпуску, плана по номенклатуре и по суммарной трудоемкости. Большая унификация деталей и узлов, несмотря на единичный характер производства, позволяет обрабатывать отдельные детали достаточно большими партиями, но, с другой стороны, это приводит к значительному разбросу размера партий обрабатываемых деталей.

В условиях многономенклатурного производства это приводит к одновременному появлению в производственном процессе партий единичных изделий и больших партий, содержащих сотни/тысячи деталей одного наименования.

Но для единичного и мелкосерийного производства характерно, что номенклатура деталей, закрепленная за производственным участком, не является постоянной, и потребности в производственных мощностях также могут сильно меняться в разных периодах. Одновременно идет производство базовых деталей для сборки конечного изделия (КИ) с длительным циклом изготовления и производство деталей остальных номенклатурных позиций с малой длительностью технологического цикла. В таких условиях неплановые простои технологических центров (ТЦ) приводят к возникновению очередей деталей на обработку в середине и конце планового периода, образуются узкие места в производственном процессе и срываются сроки поставки обработанных деталей для сборки КИ.

Цель работы заключается в моделировании оперативного плана работы технологических центров с учетом изменяющихся потребностей в производственных мощностях и партий деталей, обеспечивающего улучшение использования производственных мощностей и сокращение срыва сроков выпуска деталей для конечной сборки на основе минимизации неплановых простоев оборудования и рабочих мест.

Задачи исследования:

1. Анализ особенностей оперативного планирования и систематизация основных причин простоя станков и потерь рабочего времени, снижающих коэффициент загрузки технологических центров.
2. Анализ статистики отказов оборудования и построение функции распределения отказов.
3. Моделирование перераспределения загрузки мощностей технологических центров в соответствии с расчетом размера партии деталей для обработки.
4. Построение имитационной модели минимизации срыва сроков выпуска деталей на основе приоритизации загрузки рабочих мест и учета плавающих сроков выпуска деталей.
5. Апробация разработанной модели на ПАО «ДНПП» в качестве модуля автоматизированной информационной системы (АИС) «Диспетчер» и оценка эффективности внедрения.

Объектом исследования являются предприятия машиностроительного комплекса РФ с единичным и серийным типом производства.

Предметом исследования являются процессы и инструменты оперативно-календарного планирования.

Область исследований диссертации соответствует пунктам 16 и 23 паспорта специальности 2.5.22:

16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов.

23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

Степень разработанности темы:

Разработке научных основ в области оперативно-календарного планирования и технического обслуживания технологических центров для повышения производственной мощности предприятий посвящены работы В.А. Долгова, М.Е. Ставровского, Р.И. Макаровой, С.А. Васина, В.Н. Козловского, В.Г. Воробьева, А.Е. Акиннеева, И.А. Биргера, Л.М. Червякова, В.В. Иванова, А.В. Мельникова, А.Л. Манакова, Р.А. Галямова, Д.В. Антипова, А.В. Кизима, Ю. М. Правикова, Г.Р. Муслиной, Б.Ф. Забелина, Н. Н. Кокушина.

Несмотря на то, что большинство научных трудов и существующих инструментов автоматизации оперативного планирования учитывают особенность эксплуатации технологического оборудования, анализ, проведенный в диссертации, показал необходимость моделирования оперативного плана работы ТЦ за пределами планового периода с учетом «плавающих» сроков чистовой обработки деталей в ситуации непрогнозируемых неплановых отказов, что позволит перераспределять загрузку рабочих мест и дефицитные/избыточные мощности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обосновано, что эффект узкого места в производстве и проблема дефицита мощностей обусловлены появлением неплановых отказов, соответствующих функции распределения Коши; в отличие от других функций распределений, учитываемых при планировании загрузки мощностей и персонала, при таком распределении невозможно прогнозировать неплановые отказы и своевременно корректировать планы загрузки станков и рабочих мест, особенно в середине и конце плановых периодов, при этом ТЦ недоступны для обработки деталей длительное время.
2. Сделан вывод о решающем значении размера партии деталей по разным позициям номенклатуры для обеспечения интенсивной загрузки мощностей на основе анализа причин появления скрытых узких мест в производстве.
3. Проведено математическое моделирование перераспределения загрузки мощностей технологических центров с определением размера партии деталей для сборки КИ и номера технологической операции, когда начинает образовываться очередь деталей на обработку.
4. Построена имитационная модель, увязывающая выпуск необходимой номенклатуры деталей для комплектации КИ в соответствии с имеющейся в наличии мощностью ТЦ определенной группы в случае возникновения непланового простоя в середине/конце планового периода; в отличие от существующих, такая модель позволяет обеспечить рациональную загрузку рабочих мест и получить оптимальное расписание с учетом плавающих данных о сроке выпуска детали.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в интеграции разработанных моделей в автоматизированную информационную систему (АИС) «Диспетчер» и внедрения автоматизированной методики оперативно-календарного планирования на предприятиях промышленности для сокращения сроков изготовления и мобилизации внутренних резервов производственной мощности ТЦ.

Положения, выносимые на защиту:

- Обоснование появления дефицита мощностей ТЦ и скрытых узких мест в производственном процессе на основе анализа причин простоя и статистической обработки неплановых отказов;
- Вывод о влиянии размера партии деталей и номера операции, когда происходит разрыв партии на обработку по причине непланового отказа ТЦ, на появление узкого места в рабочем процессе;
- Расчет загрузки ТЦ с определением размера партии деталей на обработку для сборки КИ;
- Имитационная модель, учитывающая появление узких мест в производственно-технологическом процессе в середине/конце планового периода, перераспределение мощностей для изготовления деталей и плавающие сроки выпуска деталей, обеспечивающая минимизацию срыва сроков выпуска деталей на основе приоритизации загрузки рабочих мест.

Обоснованность и достоверность результатов основывается на использовании в диссертации теоретической и методологической базы теории организации и планирования машиностроительного производства, теории надёжности, методов теории вероятности и статистического анализа, математического аппарата и инструментов имитационного моделирования.

Результаты работы, подтвержденные актами внедрения, использованы ПАО «ДНПП» (Долгопрудненское научно-производственное предприятие) при автоматизации оперативного планирования загрузки и внутри и межцехового перераспределения мощностей ТЦ при производстве изделий единичного и мелкосерийного выпуска; в «КБ «Мотор» (филиал ЦЭНКИ) при производстве и гарантийном обслуживании наземного оборудования.

Апробация работы: основные положения и результаты диссертации были доложены на международных и всероссийских научно-практических конференциях: XI Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы». Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» (МК-546), 2019; VI научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2021; X Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования». Пенза: МЦНС «Наука и просвещение» (МК-1097), 2021; VII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2022.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 7 статей - в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, из которых 5 включены в перечень по специальности 2.5.22, 4 статьи в сборниках международных и всероссийских конференций. Общий объем публикаций автора составляет 2,15 п.л.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и заключения, списка литературы из 107 наименований. Диссертация содержит 125 страниц основного текста, 23 рисунка, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также сведения о реализации и публикациях полученных результатов.

В Главе 1 «Анализ проблем оперативного планирования производственных процессов и обеспечения надёжности технологического оборудования» проведен анализ основных подходов к формированию и автоматизации оперативно-календарного плана производственных процессов на предприятиях машиностроения, систем мониторинга надежности технологического оборудования, непродуктивных потерь станочного и рабочего времени, проведена классификация причин простоя технологических центров.

При формировании оперативного плана обязательно учитывается тип производства (серийность выпуска продукции), конструктивные и технологические особенности изделий, специфика технологического оборудования и уровень внутри, меж цеховой и внешней кооперации основного производства. В массовом и крупносерийном производстве выполнение плана предприятия по номенклатуре и плана по отгрузке продукции контролируется по соответствию сроков выпуска изделий сборочным цехом (а при необходимости — прохождением испытаний) календарному плану; по обрабатывающим цехам и цехам узловой сборки — по срокам выпуска ведущих деталей и узлов.

В диссертации проведен анализ особенностей оперативно-производственного планирования (ОПП) в единичном и серийном производстве и были проанализированы факторы, влияющие на эффективность ОПП.

На основе результатов анализа были систематизированы основные виды потерь рабочего времени, снижающие коэффициент загрузки K_z оборудования. Проведенный анализ простоев оборудования за 1 квартал 2025 года по группам простоя показал:

- производственный простой составляет 26ч. или 2,8% от фонда рабочего времени;
- организационный простой – 127 ч. или 13% от фонда рабочего времени;
- нерегламентированный простой – 50 ч. или 5% от фонда рабочего времени;
- технический простой – 102 ч. или 11% от фонда рабочего времени.

Далее проанализированы причины простоя станков. При этом в группе «Организационный простой»:

- 89 часов отсутствие технологической оснастки (9% от фонда рабочего времени);
- 25 часов на внедрение детали (2,7% от фонда рабочего времени);
- 5 часов отсутствие заготовок (0,6% от фонда рабочего времени);
- 8 часов отсутствие инструмента (0,8% от фонда рабочего времени).

В группе «Технический простой»:

- 94 часа станок находился на ремонте (10 % от фонда рабочего времени);
- 8 часов простаивал станок в связи с аварией (0,8% от фонда рабочего времени).

Наибольшие потери показали организационные простои, более 127 часов суммарного рабочего фонда времени. Если посмотреть на анализ причин простоев, потери рабочего времени по организационным причинам связаны в большинстве ситуаций с проблемой увязки оперативного плана и фактических данных, а потери времени в группе «Технический простой» обусловлены снижением надежности оборудования, авариями и нерегламентированными ремонтами. Таким образом, это приводит к необходимости исследовать вопросы обеспечения надёжности ТЦ и появления неплановых отказов.

В Главе 2 «Организация процессов обеспечения надёжности ТЦ на предприятии и анализ простоев на основе данных системы мониторинга АИС «Диспетчер» изложены методы оценки технического состояния оборудования и организации процессов обеспечения надёжности ТЦ на предприятии; описан процесс мониторинга состояния ТЦ в АИС «Диспетчер» на ПАО «ДНПП», построен полигон отказов по набранной статистике отказов и определена функция распределения отказов методом наибольшего правдоподобия.

На предприятиях машиностроения процессы оперативного планирования в основном автоматизированы; если были использованы зарубежные продукты, то в настоящий момент идет разработка и переход на отечественное программное обеспечение.

В результате работы автоматизированной информационной системы должны снижаться затраты на единицу продукции, сокращаться выпуск брака, повышаться производительность труда и качество продукции в целом. Данные о технических и рабочих состояниях оборудования (Станок Включен - Выключен, Работа по программе, Авария и др.) получаются системой в автоматическом режиме. В отчетах выдается информация по основным состояниям оборудования в часах, длительность которых складывается из длительностей, определенных в системе мониторинга состояний и причин простоя технологического оборудования, которые объединяются в группы. Причины простоя задаются персоналом вручную.

Используя данные мониторинга простоев ТЦ и их причин в АИС «Диспетчер», был проведен сводный анализ работы обрабатывающего центра DMG mori CTX-510 в долях от фонда рабочего времени: $T_{\text{фонд}} = 964 \text{ ч.}$; $T_{\text{прост. тех.}} = 94 \text{ ч.}$ (9,8%). Коэффициент общей эффективности (ОЕЕ) = 60,72, то есть фактическая загрузка оборудования низкая и оборудование используется неэффективно.

Таким образом, сделан вывод: существуют «скрытые» узкие места в производственном процессе, которые сложно обнаружить в начале оперативного периода, но создающие проблему дефицита мощности и простои рабочих мест.

Для выявления причин появления таких узких мест был проведен анализ поломок и простоев, построен полигон отказов (Рис. 1) и выявлены пиковые моменты недоступности рабочих центров. Далее решалась задача построения теоретической зависимости и определения функции распределения методом наибольшего правдоподобия. Наиболее полно задаче отвечает распределение Коши.

Из анализа статистических данных видно, что «хвост» у кривой (Рис. 2) данного распределения является «тяжелым», потому что время от времени возникают поломки, при устранении которых технологическое оборудование недоступно в течение длительного времени, часто превышающего период оперативно-календарного плана (нескольких рабочих смен). Несмотря на то, что распределение Коши свидетельствует о том, что такие поломки встречаются редко, они являются причиной появления узкого места в загрузке мощностей – прогнозировать их невозможно, следовательно, корректировать загрузку в середине и конце периода очень проблематично.

В ситуации, когда распределение отказов представляет собой функцию Коши, то есть не укладывается в классические принятые функции распределения (Пуассона, Вейбулла-Гнеденко, нормальный закон, экспоненциальный и т.д.), необходимо быстро перераспределять производственные мощности, чтобы остановить рост незавершенного производства, но в условиях единичного и мелкосерийного производства это усложняется размерами партий на обработку и многономенклатурностью деталей.

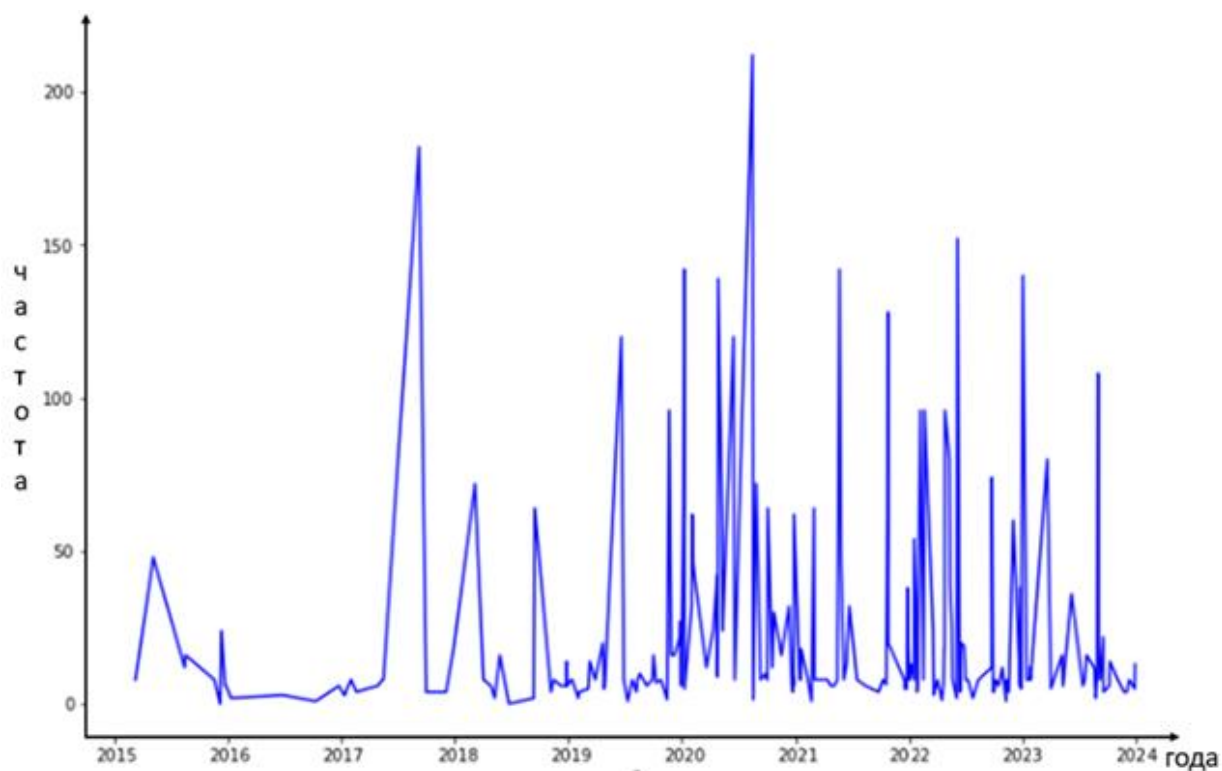


Рис. 1. Полигон отказов

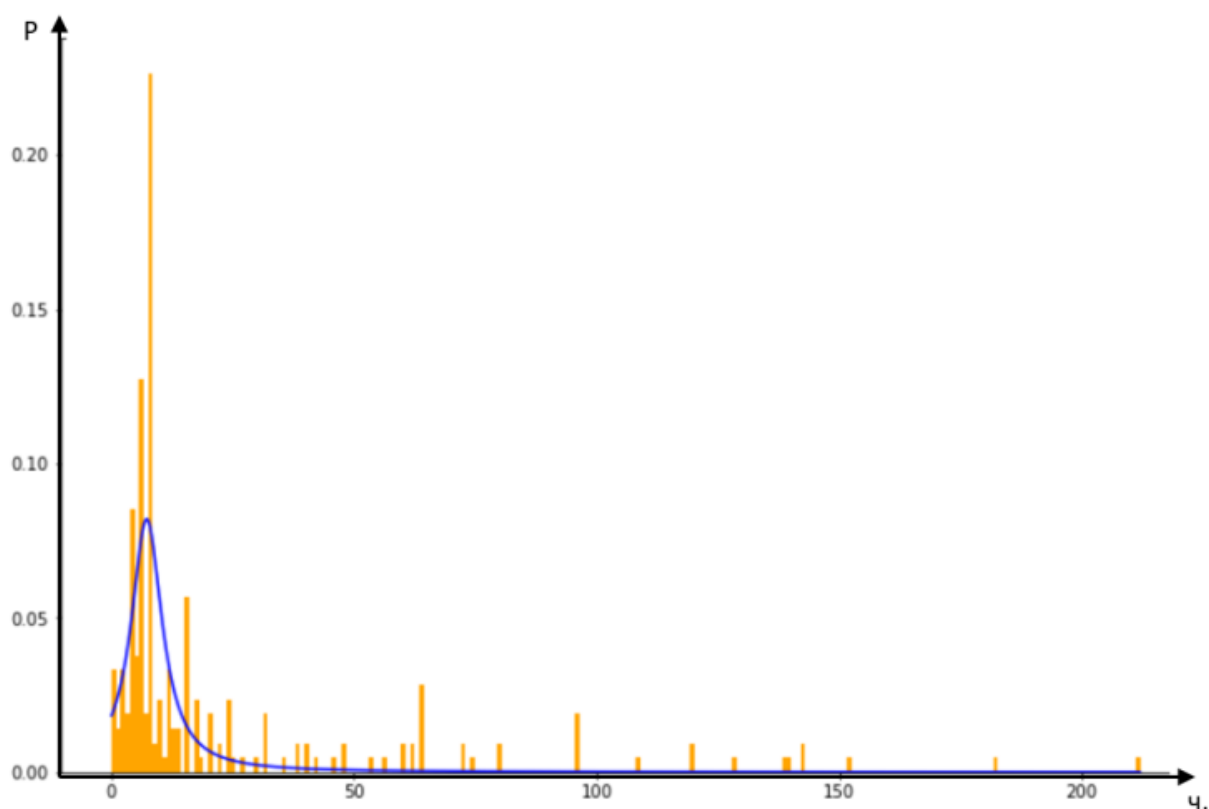


Рис. 2. Реализация аппроксимации распределения Коши

В Главе 3 «Построение модели оперативного планирования работы технологических центров в условиях неплановых отказов с учетом проблематики единичного и мелкосерийного производства» исследована проблематика

оперативного планирования мелкосерийного производства, решена задача определения размера партии деталей для обработки и загрузки мощностей ТЦ, построена модель минимизации срыва сроков выпуска деталей.

Для мелкосерийного производства характерна большая унификация деталей и узлов, несмотря на единичный характер производства. С одной стороны, это позволяет обрабатывать отдельные детали достаточно большими партиями, но с другой стороны, это приводит к значительному разбросу размера партий обрабатываемых деталей. Это приводит в производственном процессе одновременно к появлению партий единичных изделий и партий, содержащих сотни/тысячи деталей одного наименования. При этом, одновременно идет производство базовых деталей для сборки конечного изделия (КИ) с длительным циклом изготовления и производство деталей остальных номенклатурных позиций с малой длительностью технологического цикла.

Подетальное задание может содержать половину и больше позиций «дефицитных» деталей, то есть деталей обязательного выпуска. Размеры партий деталей будут ограничиваться наличием заготовок на складе и мощностью (пропускной способностью) оборудования (технологических центров, ТЦ). При дефиците мощности приходится делить партию деталей на две части: одна часть должна быть обязательно изготовлена в объеме, необходимом для сборки КИ в данном периоде; вторая часть остается в незавершенном производстве этого производственного участка.

Не всегда можно констатировать факт наличия узкого места при загрузке производственных мощностей ТЦ на начальных этапах обработки. Для единичного и мелкосерийного производства характерно, что номенклатура деталей, закрепленная за производственным участком, не является постоянной, и потребности в производственных мощностях также могут сильно меняться в разных периодах.

Узкие места в загрузке мощностей технологических центров являются «плавающими» - изменяющиеся по разным группам оборудования не только к началу планового периода, но и в самом плановом периоде (в середине или ближе к концу периода), что потребует срочного перераспределения мощности. Это сложно быстро учесть в подетальном задании, его срок и план рабочего участка может быть по длительности сопоставим с временем нахождения узкого места по загрузке ТЦ. А с учетом длительных простоев, вызванных неплановыми отказами, попадающими в распределение Коши, скорость образования очереди деталей на обработку приобретает взрывной характер.

Таким образом, размер партии по разным позициям номенклатуры для многономенклатурного малосерийного производства приобретает решающее значение в вопросе эффективности оперативного планирования производства.

Необходимо определить номер технологической операции, когда происходит разрыв партии на две части и возникает непредусмотренная очередь деталей на обработку ТЦ; этот номер будет «плавающим», определяющим возникновение узкого места в загрузке. С этой целью был введен первый критерий оптимизации - на минимизацию суммарного количества операций, на которых производится обработка деталей в размере Y :

$$K_1 = \sum_{i=1}^m \Delta_i \rightarrow \min,$$

где m – количество номеров операций обработки в поддетальном задании; Δ_i – количество операций, на которых производится обработка i -й детали в количестве, необходимом для сборки (Y); $i=1, \dots, m$.

В соответствии с этим критерием и условиями по загрузке мощностей ТЦ, в соответствии с количеством заготовок на складе и потребностью для сборки была построена математическая модель и соответствующий алгоритм (Рис.3). Для соблюдения сроков производства деталей для последующей сборки в модель был введён коэффициент напряженности сроков изготовления. В результате моделирования получаем номер технологической операции, на которой потенциально возможен неплановый отказ технологического оборудования. Далее в модель были введены критерии для оперативного перераспределения загрузки ТЦ - минимум срыва сроков производства и минимум простоев рабочих мест:

$$K_2 = \sum_{i=1}^m (d_i - c_i) \rightarrow \min, \quad K_3 = \sum_{k=1}^n p_k \rightarrow \min$$

где n - количество рабочих мест; $k=1, \dots, n$; c_i - плавающая дата выпуска i -й детали (по причине простоя и дефицита мощности); d_i - плановый срок выпуска i -й детали; p_k - простои k -го рабочего места.

Введем приоритет деталей на обработку α_i :

$$\alpha_i = b_i - d_i - t_i$$

где b_i - срок окончания изготовления i -й детали на предыдущей операции.

После выполнения φ -й операции приоритет очереди деталей на обработку примет значение:

$$\alpha_i(\varphi) = b_{i\varphi} - d_i - t_i',$$

где $b_{i\varphi}$ - срок прохождения i -й деталью φ -й операции; t_i' - оставшееся время технологического цикла после выполнения φ -й операции.

Для выбора детали на освободившееся k рабочее место для обработки имеет значение соотношение ее приоритета к приоритету других деталей, поэтому можно определять приоритет текущей операции по отношению к предыдущей операции:

$$\alpha_i' = \alpha_i + t_{i\varphi},$$

где α_i - приоритет предыдущей операции; α_i' - приоритет текущей операции.

На основе приоритизации деталей в очереди на обработку и приоритизации рабочих мест осуществляется загрузка рабочих мест до тех пор, пока для очередного (первого по приоритету) k -го рабочего места не станет выполняться условие $\eta_k \leq 0$. Чтобы в модели пересчитывались разные коэффициенты выполнения рабочих норм и коэффициенты сменности, введен интервал T_i :

$$T_i = b_i - c_i$$

Это позволит для деталей, обрабатываемых на имеющихся мощностях ТЦ, составить график с учетом рабочих смен и норм. Множество деталей $\{D_i\}$, $i = 1, 2, \dots, i_j, i_{j+1}, \dots, m$, которые необходимо произвести для последующей сборки КИ, делится на два подмножества:

$\{D_{i_j}^1\}$ - подмножество деталей с номерами $i = 1, 2, \dots, i_j$, обработка которых завершена, и известно значение величины c_i ;

$\{D_{i_{j+1}}^2\}$ - обработка деталей с номерами $i = i_{j+1}, \dots, m$ из этого подмножества заканчивается уже после планового периода, и величина c_i неизвестна.

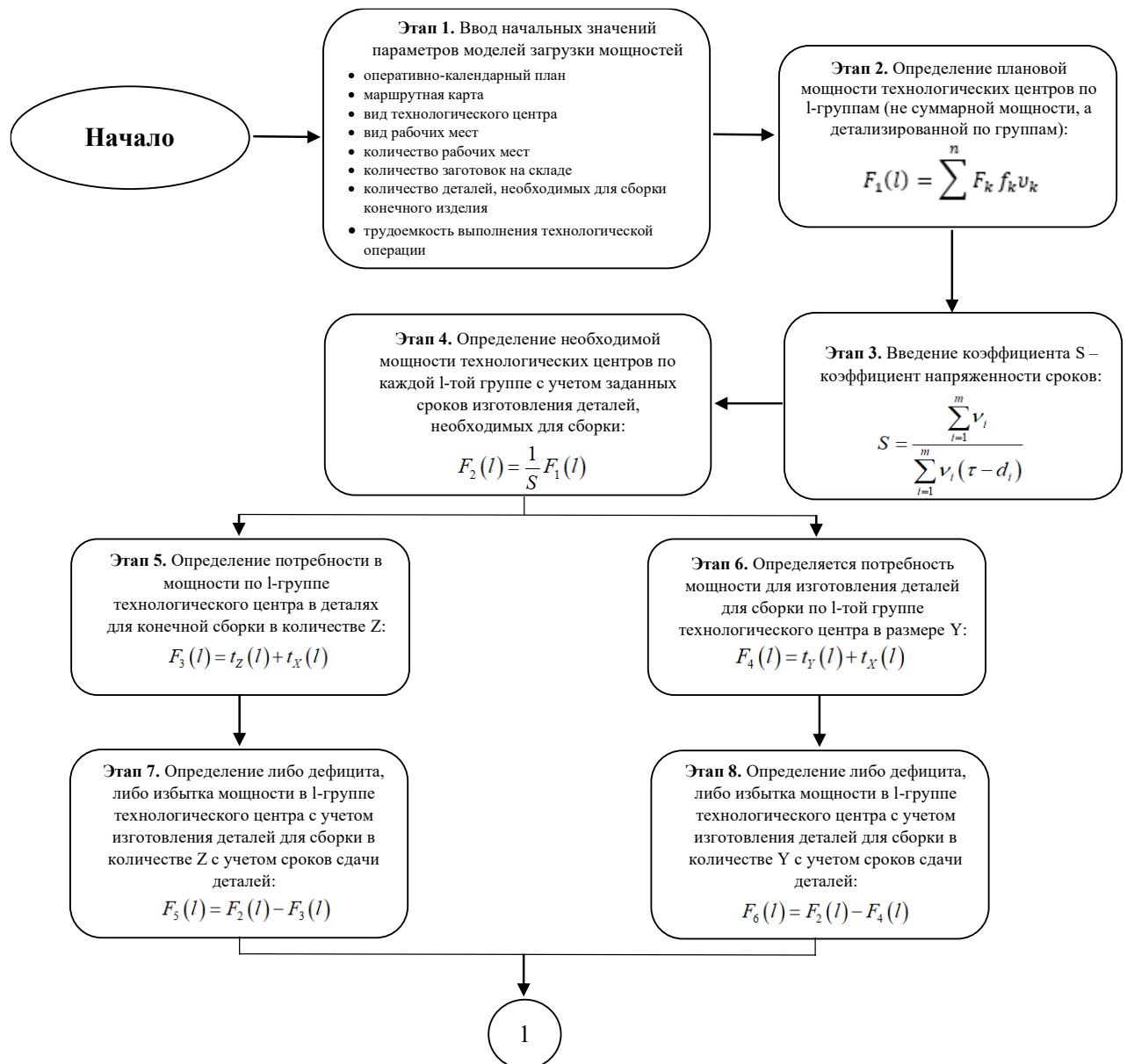


Рис. 3 Алгоритм моделирования загрузки мощностей технологических центров в соответствии с количеством заготовок на складе и потребностью для сборки с учетом напряженности сроков изготовления

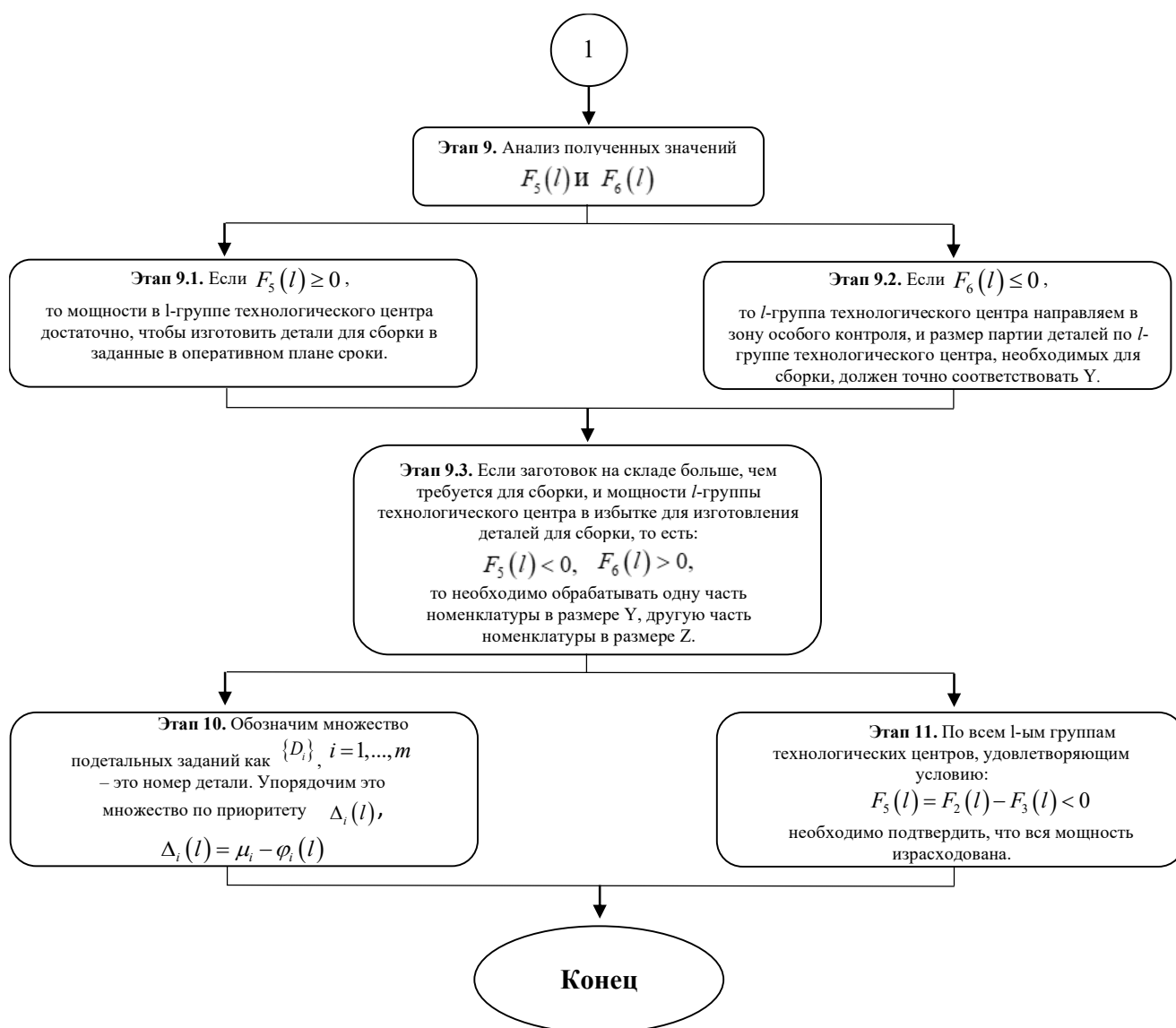


Рис. 3 Алгоритм моделирования загрузки мощностей технологических центров в соответствии с количеством заготовок на складе и потребностью для сборки с учетом напряженности сроков изготовления (окончание)

В ситуации, когда дата выпуска детали c_i зависит от скорости по устранению эффекта бутылочного горлышка, пересчет приоритета текущей операции α_i' будет по следующей формуле:

$$\alpha_i' = \alpha_i + b_{i\varphi} - b_{i\varphi}',$$

где $b_{i\varphi}$ - срок окончания φ -й операции в текущей итерации; $b_{i\varphi}'$ - срок окончания φ -й операции в предыдущей итерации.

Таким образом, в модели перераспределяются мощности ТЦ в соответствии с «плавающими» сроками выпуска деталей и корректируется оперативный план в условиях непредвиденных обстоятельств. Разработанная модель используется в качестве модуля АИС «Диспетчер» для построения графика производства в оперативном плане.

В Главе 4 «Построение и апробация имитационной модели минимизации срыва сроков выпуска деталей и перераспределения мощностей ТЦ» описана схема основных этапов методики оперативно-календарного планирования производственного расписания в АИС «Диспетчер» и проведены результаты апробации в ПАО «ДНПП», включая расчет загрузки оборудования, даны рекомендации в ситуациях возникновения неплановых отказов.

В диссертации была создана гибридная имитационная модель (дискретно-событийная, агентная) оперативного планирования производственно-технологических процессов в среде моделирования AnyLogic. По результатам проведенных экспериментов были выявлены критические места технологического процесса по таким параметрам, как время выполнения операции и длина очереди деталей на операцию (Рис. 4 и 5).

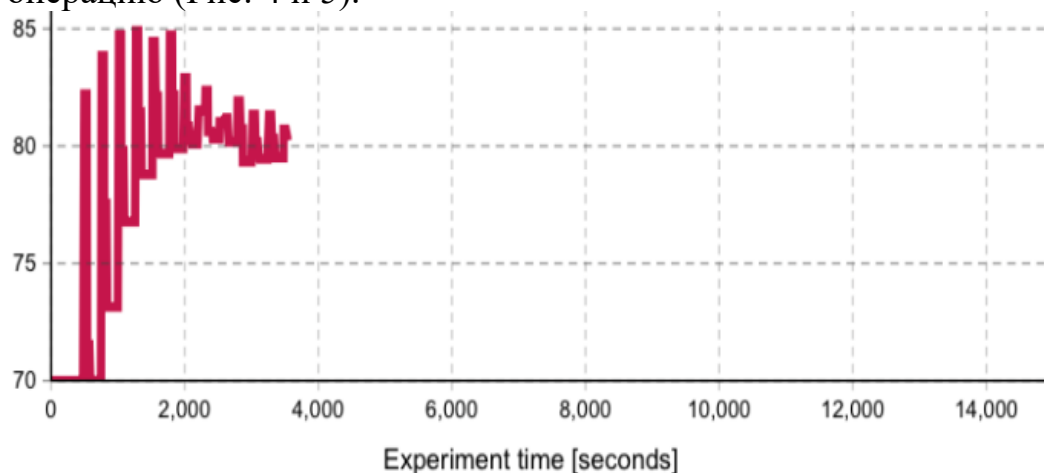


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования - среднее время выполнения операций во время имитации

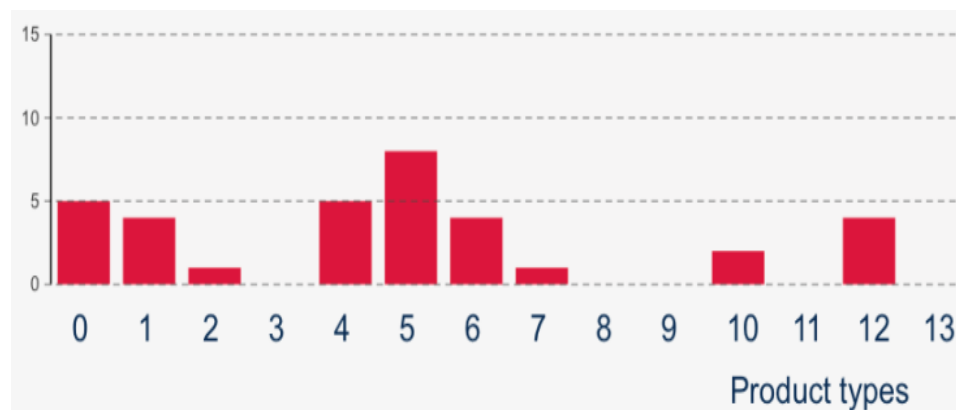


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования - количество деталей в заделе по типам во время имитации

В диссертации в 4 главе приводится журнал норм времени и расчет мощности на производственный участок (15 станков). В результате в АИС «Диспетчер» рассчитывается плановый срок изготовления и полученное производственное расписание доводится до производственных подразделений. В Таблице 1 приведен фрагмент расчетов и выделена операция, на которой произошла поломка, и стала образовываться очередь на обработку.

Таблица 1

Расчет объемов в соответствии с планом производства

Наименование детали	объем, штук	наладка фрезерных ЧПУ на 1 штуку, мин	наладка фрезерных ЧПУ объем, час	фрезерная ЧПУ на 1 шт, мин	фрезерные ЧПУ объем, час	слесарные на 1 шт, мин	слесарные объем, час	наладка токарных ЧПУ на 1 шт, мин	наладка токарных ЧПУ объем, час	токарная ЧПУ на 1 шт, мин	токарная ЧПУ объем, час	промывочная на 1 шт, мин	промывочная объем, час	Итого на деталь, мин	Итого объем, час
дет 1	50	5	4,2	28,75	24	20	16,7	26,4	22	151,8	126,5	6	5	237,95	198,4
дет 2	50	4	3,3	23	19,2	12	10	20	16,7	115	95,8	3	2,5	177	147,5
дет 3	104	11	19,1	63,25	109,6	20	34,7	55	95,3	316,25	548,2	6	10,4	471,5	817,3
дет 4	50	0,72	0,6	4,14	3,5	1,5	1,3	3,6	3	20,7	17,3	1	0,8	31,66	26,5
дет 5	100	16,48	27,5	94,76	157,9	24	40	82,4	137,3	473,8	789,7	6	10	697,44	1162,4
дет 6	100	0,48	0,8	2,76	4,6	1	1,7	2,4	4	13,8	23	0,5	0,8	20,94	34,9
дет 7	100	1,08	1,8	6,21	10,4	1,7	2,8	5,4	9	31,05	51,8	2	3,3	47,44	79,1
дет 8	50	0,56	0,5	3,22	2,7	0,7	0,6	2,8	2,3	16,1	13,4	0,5	0,4	23,88	19,9
дет 9	150	0	0	0	0	0	0	47	117,5	270,25	675,6	12	30	329,25	823,1
дет 10	100	0	0	0	0	0	0	6,4	10,7	36,8	61,3	3	5	46,2	77
дет 11	200	4,52	15,1	25,99	86,6	2,5	8,3	22,6	75,3	129,95	433,2	12	40	197,56	658,5
дет 12	100	0,84	1,4	4,83	8,1	0,5	0,8	4,2	7	24,15	40,3	3	5	37,52	62,6
дет 13	50	1,88	1,6	10,81	9	5,55	4,6	9,4	7,8	54,05	45	12	10	93,69	78

Далее в модуле корректировки расписания по разработанным моделям была определена партия деталей, на которой произошел сбой, и оценивались следующие пути решения возникшего узкого места:

1. Перебросить часть партии деталей с токарных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на универсальные в этом же подразделении или другой цех (по модели идет расчет плавающего срока изготовления);

2. Изменить графиков работ и ввести 3 смены на самом загруженном оборудовании (модель учитывает сменность и пересчитывает график);

3. Перенос операций с одного вида станков с ЧПУ на обрабатывающие центры (объединение фрезерной и токарных операций), но это потребует времени для дооснащения центров оснасткой, инструментом и т.д.;

4. Балансировка загрузки оборудования, перевод части позиций на собственные/покупные мощности для изготовления таких покупных комплектующих изделий (ПКИ), как штифты, шпонки, гайки и т.д.

Моделировались и сравнивались 1 и 2 варианты; 3 и 4 вариант требуют больших затрат времени и ресурсов. В итоге был выбран вариант 2 - при моделировании загрузки ТЦ и рабочих мест в условиях 3-х сменной работы этот вариант показал минимальный срыв срока выпуска комплектов для сборки КИ в условиях непредвиденных простоев и сокращение суммарных простоев рабочих мест при использовании собственных мощностей ТЦ.

По результатам моделирования загрузки мощностей ТЦ заказы выполнены в срок и минимизированы суммарные простои рабочих мест за счет использования мощностей соседних ТЦ (межцеховой кооперации) и рациональной загрузки их рабочих мест, сокращения потери по причинам организационного и технического

простоя технологического оборудования. Таким образом, уменьшилось время простоя станка с 94ч. до 54ч. за 2 квартал 2025 года (с 9,8% до 5,1%, что составило 4,7% от фонда рабочего времени; увеличение выпускаемых деталей на рабочем месте с 450 шт. в квартал до 471 шт.) Коэффициент общей эффективности оборудования ОЕЕ вырос на 7,4%.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ причин снижения загрузки ТЦ, потерь рабочего времени и появления узких мест в производственно-технологических процессах выявил низкую эффективность ОПП и необходимость поиска внутренних резервов интенсификации мощностей, а исследование данных мониторинга АИС «Диспетчер» подтвердило возникновение непродуктивных потерь станочного и рабочего времени (Глава 1, п.1.1).

2. Систематизация причин простоя станков и простоев рабочих мест показала, что самые большие потери времени возникают по организационным и техническим причинам, в частности, при нерегламентированных простоях ТЦ (Глава 1, п.1.2). Решение задачи определения функции неплановых отказов показало, что наиболее длительные простои соответствуют функции распределения Коши; характерные особенности такого распределения – довольно редкое возникновение событий, но при полной невозможности их прогнозировать, следовательно, и корректировать оперативно-календарный план. В результате возникновения отказа ТЦ по функции Коши возникает узкое место в производственном процессе, растет незавершенное производство, срываются сроки выпуска деталей для сборки КИ (Глава 2, п.2.3).

3. Исследование особенностей объема и широты номенклатуры партий деталей в единичном и мелкосерийном производстве позволило сделать вывод, что в таких ситуациях приобретает главное значение размер партии деталей, так как в производстве одновременно находятся партии единичных изделий и партии, содержащие сотни/тысячи деталей одного наименования. При этом, идет производство базовых деталей для сборки КИ с длительным циклом изготовления и производство деталей остальных номенклатурных позиций с малой длительностью технологического цикла. Номенклатура деталей и потребности в мощностях ТЦ также могут меняться в зависимости от вида выпускаемого КИ (Глава 3, п.3.1). В диссертации также сделан вывод, что узкие места в загрузке ТЦ являются плавающими, что осложняет процессы расчета графиков производства. Моделирование загрузки мощностей ТЦ, представленное в диссертации, (Глава 3, п.3.2), позволяет определить объем партии деталей и дефицит/избыток мощностей ТЦ для их обработки.

4. Разработанная в диссертации имитационная модель (Глава 3, п.3.3) позволяет в середине/конце планового периода в случае непланового простоя определить перераспределение загрузки рабочих мест и мощностей с учетом сменности работы и неизвестных данных о сроке выпуска деталей.

5. Представленные в диссертации разработки апробированы в ПАО «ДНПП» в АИС «Диспетчер» в качестве модуля оперативной корректировки

загрузки мощностей ТЦ. Их применение позволило выполнить производственное задание в договорной срок за счет установки приоритета деталей на обработку, перераспределения производственных мощностей, и сократить суммарные простои рабочих мест по причинам организационного и технического характера на 4,7%, при этом коэффициент общей эффективности оборудования ОЕЕ вырос на 7,4%.

Направлениями и перспективами дальнейшего развития исследований по теме диссертации является разработка автоматизированных систем планирования производственных процессов, включающих инструменты имитационного моделирования и предиктивной аналитики простоев и графика ремонтов ТЦ..

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Поляков А.А., Чихладзе З.Д., Шевченко В.Ф. Мониторинг процесса проведения технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием технологии дополненной реальности // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 2(104). С. 45-50. (0,63 п.л./0,4 п.л.);
2. Предиктивный анализ состояния технологического оборудования / Поляков А.А. [и др.]. // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 6(120). С. 48-52. (0,5 п.л./0,3 п.л.);
3. Поляков А.А., Четвергов В.А., Вычегжанин К.А. Использование методов модельно-ориентированного системного инжиниринга при создании методики планирования производственного процесса освоения новых продуктов на предприятиях ОПК // Русский инженер. 2021. №03(72). С. 28-32 (0,5 п.л./0,3 п.л.);
4. Поляков А.А., Бром А.Е. Модель отказов технологического оборудования при оперативно - календарном планировании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 5. С. 69-75 (0,6 п.л./0,5 п.л.);
5. Поляков А.А. Снижение времени простоя технологического оборудования предприятия //Компетентность /Competency (Russia) 2025. №06 С. 39-45 (0,35 п.л.).

Публикации в других рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

6. Поляков А.А., Чихладзе З.Д., Шевченко Р.В. Оценка эффективности визуализации производственной информации на основе комплексного подхода к ее основным компонентам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. № 1 (49). С. 54-58. (0,5 п.л./0,3 п.л.).

Участие в конференциях:

7. Поляков А.А. Интеграция Индустрии 4.0 в производство // Тезисы докладов X Международной научно – практической конференции «Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы». Пенза. 2019. С. 36-38.
8. Поляков А.А. Методика анализа надежности технологического оборудования производственного подразделения по параметрам производительности // Материалы VI научно-технической конференции

«Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва. 2021. С. 59.

9. Поляков А.А., Чихладзе З.Д., Умнов П.И. Предиктивный анализ при проведении ТОиР // Тезисы докладов X Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования». Пенза. 2021. С. 40-43.

10. Поляков А.А. Модель отказа технологического оборудования при оперативно-календарном планировании для повышения производительности // Материалы VII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва. 2022. С. 50.

Объекты интеллектуальной собственности:

11. Поляков А.А. Программа для прогнозирования недоступности технологического оборудования, по статистической оценке, показателей безотказности на основе данных по отказам / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023669240 12.09.2023. Заявка №2023668460 от 05.09.2023.