

На правах рукописи  
УДК 621.9

Никоноров Алексей Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ  
ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2024

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

Научный руководитель: **Анцупов Александр Викторович**

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Маликов Андрей Андреевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой технологии  
машиностроения ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»

**Аббясов Валерий Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
технологий и оборудования машиностроения  
ФГАОУ ВО «Московский политехнический  
университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «\_\_\_» 2024 г. на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет им. Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, Москва, 2-я  
Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим  
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8(499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь совета

к.т.н., доцент



Богданов А.В.

## **Актуальность работы**

Развитие рыночной экономики в России привело к необходимости модернизации машиностроительных предприятий с применением цифровой трансформации, призванной повысить производительность за счет рационального использования имеющихся ресурсов. В сложившихся условиях актуальным вопросом остается обоснование эффективности технологических решений (ТР), принимаемых при проектировании технологических процессов (ТП). Решение его имеет особую ответственность в ситуации проектирования технологических комплексов (ТК), основу которого составляют задачи выбора оборудования и расчета его количества, традиционно решаемые независимо с применением детерминированных данных.

Задача выбора оборудования трудно формализуема и связана с субъективными, экспертными оценками возможности выполнения технологических операций (ТО) на выбранном оборудовании. Решение задачи расчета количества оборудования традиционными методами предполагает обеспечение производительности проектируемого ТК с запасом. Однако величина запаса производительности, гарантирующего выпуск продукции в заданных объемах и с требуемой вероятностью, проектом не регламентируется. Расчеты не указывают на надежность выполнения требований задания на проектирование после ввода оборудования в эксплуатацию ввиду неизвестных отклонений фактических затрат времени от устанавливаемых в ТП значений и укрупненной оценки потерь времени работы оборудования. Связи производительности оборудования с процессом целенаправленного формирования качества изделий в терминах погрешностей также не учитываются, что затрудняет представление специалиста о возможности внесения обоснованных и целесообразных изменений в ТП с целью повышения производительности ТК.

Приведенные соображения позволяют сделать вывод о возможной недостаточной производительности ТК, заложенной при проектировании, и риске ее неприемлемых значений. Использование концепций, предусматривающих учет факторов неопределенности и категорию риска, как основу для принятия ТР, на сегодняшний момент не является общепринятым. Учет факторов неопределенности, связанных с надежностью технологических систем (ТС), в настоящее время характерен для исследований в области организации производства, в рамках которой процесс выбора ТР не рассматривается. Изучение вопроса невозможно без основополагающих закономерностей формирования качества изделий и теории производительности, представленных в работах А.П. Соколовского, В.С. Корсакова, А.М. Дальского, А.И. Кондакова, Л.И. Волчевича, Г.А. Шаумяна, А.Н. Иноземцева, А.В. Сгибнева, В.Д. Шашурина и других ученых. Подходы технологии машиностроения могут затрагивать не все причины снижения производительности, а лишь связанные с реализацией ТП и корректирующими мероприятиями по внесению изменений в ТП.

Все вышеприведенное определяет актуальность исследования и содержание работы, направленной на повышение качества ТР, принимаемых при проектировании ТП механической обработки с учетом влияния ТП на производительность ТК и риск ее неприемлемых значений.

**Объектом исследования** в диссертации являются ТП и ТК изготовления деталей машин методами механической обработки, **предметом исследования** – научные и методологические принципы и методики выбора ТР применительно к ТП и ТК механической обработки.

### **Цель диссертационной работы**

Повышение производительности ТС на основе разработки аналитического метода выбора ТР при проектировании ТП механической обработки.

### **Задачи исследования**

1. Разработать концептуальный подход к выбору ТР на основе прогноза фактической производительности ТС и риска ее неприемлемых значений.
2. Сформировать метод выбора ТР при проектировании ТП механической обработки.
3. Разработать алгоритмы решения типовых задач и внедрить результаты исследований на отраслевых предприятиях при изготовлении осесимметричных деталей.

### **Научная новизна**

1. Предложен и апробирован метод выбора ТР при проектировании ТП механической обработки, отличающийся тем, что с целью повышения точности прогнозирования производительности ТС он содержит оценку риска неприемлемой производительности (РНП), определяемую на основе сценариев отказов и простоев оборудования и коэффициента его экстенсивного использования.

2. Разработана аналитическая методика количественной оценки РНП на этапах проектирования ТП, в основу которой положены модели процессов формирования параметрических отказов оборудования.

3. Научно обоснована и решена проблема повышения достоверности прогнозирования производительности ТК механической обработки за счет применения методов математической статистики.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработан инженерный метод выбора ТР по расчетному значению запаса производительности, позволяющий повысить выработку продукции в ТК механической обработки.

2. Достигнуто повышение производительности оборудования с ЧПУ токарной и фрезерной группы до 15%, увеличение загрузки до 20% и сокращение времени выполнения производственного задания на 1,5 смены на промышленных предприятиях за счет применения алгоритмов выбора ТР при технологической подготовке производства.

3. Метод выбора ТР при проектировании ТП использован в учебном процессе кафедры технологий машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке кадров Высшей школы, что подтверждено актом.

### **Методы исследования**

Применительно к проблематике диссертации использованы положения теории точности механической обработки и теории производительности, методы проектирования ТК механической обработки, основы технологии машиностроения, основы теории резания, методы теории вероятности и математической статистики,

метод дискретно – событийного имитационного моделирования производственных систем.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Концептуальный подход к проектной оценке и определению направления модификации ТП на основании совокупности данных о фактической производительности ТК и вероятностной мере РНП.

2. Метод выбора ТР на основе оценки РНП при проектировании ТК механической обработки.

3. Результаты применения метода выбора ТР при решении типовых задач в условиях действующих предприятий машиностроительной отрасли.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается использованием системного подхода и признанных методов теории точности механической обработки и теории производительности и подтверждена результатами внедрения на действующих промышленных предприятиях машиностроительной отрасли.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация посвящена развитию методов проектирования ТП на основе оценки РНП ТК механической обработки в задачах выбора ТР, что соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки) и включает п. 5 («Методы проектирования и оптимизации ТП») и п. 8. («Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении») направлений исследований.

### **Реализация результатов**

Результаты диссертации внедрены на предприятиях ООО «НПЦ «Кропус-ПО», ООО «Энергомеханика», ООО «МетМаш» в период 2009-2024 гг. Теоретические разработки диссертации используются в учебном процессе на кафедре технологий машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актами.

### **Апробация результатов**

Материалы диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях: Международных научно-технических конференциях «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2012), «Проминжиниринг» (Сочи, 2023); научно-технической конференции «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов», (Ростов на Дону, 2023). Основные разделы диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры технологий машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана в период 2009-2024 гг.

### **Публикации**

Основное содержание работы отражено в 6 научных трудах, из них – 3 в рецензируемых научных изданиях перечня ВАК РФ. Общий объем публикаций – 2,8 п.л.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы, приложения. Общий объем работы составляет 130 страниц, в том числе 19 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 135 наименований.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулирована цель и задачи исследований. Отражена научная новизна, практическая значимость работы, описаны методы исследований, степень достоверности и апробация результатов.

**В Главе 1** проведен анализ задач выбора оборудования и расчета его количества, решаемых с учетом факторов производственной неопределенности.

Учет неопределенности в задачах расчета количества оборудования связан с описанием надежности ТС и процесса их функционирования. Наиболее часто применяются показатели наработки между отказами и времени восстановления. Использование статистических показателей надежности привело к усложнению расчетов и неоднозначности трактовки расчетного количества оборудования. Применяемые методики расчета количества оборудования не учитывают их связи со структурой и параметрами ТО. В результате затруднительным оказывается анализ и оценка влияния ТР на производительность ТК. Известно, что учет таких связей может быть проведен с применением теории точности механической обработки, развитой А.П. Соколовским, и определением на основе ее положений закономерностей параметрических отказов ТС в результате влияния элементарных погрешностей. Исследования, учитывающие связи надежности ТС со структурой и параметрами ТО, проводились Л.И. Волчевичем, А.И. Дащенко, Г.А. Шаумяном, И.Л. Волчевичем и другими исследователями на основании наблюдений на действующих предприятиях. Несмотря на возможность получения детальной картины потерь времени работы оборудования, данные в условиях проектирования могут оказаться недоступными по различным причинам. Также может иметь место несостоительность результатов наблюдений при рассмотрении ранее не анализируемых ТР, что приводит к необходимости также не всегда возможной адаптации и структуризации таких результатов. Вышесказанное позволило выявить необходимость использования методов оценки производительности оборудования с использованием иных источников данных.

Известные методы многокритериального принятия решений, применяемые в задачах выбора оборудования (метод анализа иерархий, TOPSIS, ELECTRE и другие), предполагают обработку экспертных данных. Несмотря на гибкость применения методов и простоту автоматизации, оценки альтернатив и формируемые на их основе рейтинговые списки содержат субъективную неопределенность, связанную с опытом эксперта, а также постановкой задачи в ситуации принятия решения.

Таким образом, установлена необходимость поддержки процесса принятия ТР статистическими оценками производительности и риска ее неприемлемых значений в рамках действующих стандартов. Данная задача относится к обратным задачам проектирования, а для ее решения необходимо совместное решение задач выбора оборудования и расчета его количества, формирование виртуальных моделей объектов производства и организация машинных экспериментов.

**В Главе 2** решена *первая задача* диссертации – разработан концептуальный подход к выбору ТР на основе прогноза фактической производительности ТС и риска ее неприемлемых значений. На основании анализа данных ТП действующих

машиностроительных производств, эксплуатационной документации на технологическое оборудование, данных о составе технических заданий на проектирование ТК, положений отечественной теории производительности, сформулирована общая задача оценки риска применения ТР –  $R_{\text{TP}}$ . Для групп выходных характеристик объекта проектирования или его модели и случайного вектора их проектных оценок в части безопасности для человека и окружающей среды ( $S$ ), достигаемого качества производимой продукции ( $Q$ ), фактической производительности ( $P$ ) и экономической эффективности ( $E$ ), общая задача имеет следующий вид:

$$R_{\text{TP}(\tau=T)} = 1 - \int_{S^*P^*Q^*E^*} f(S, P, Q, E) dS dP dQ dE \leq R_{(\tau=T)}^*, \quad (1)$$

где  $S^*P^*Q^*E^*$  – область допустимых ограничений показателей объекта проектирования, полученных на основании задания на проектирование, в том числе конструкторской и технологической документации, нормативной документации в области проектирования ТК и иных нормативно – правовых актов действующего законодательства;  $f(S, P, Q, E)$  – плотность совместного распределения выходных показателей объекта проектирования в момент времени  $\tau$ , соответствующее периоду применения ТР –  $T$ ;  $R_{(\tau=T)}^*$  – предельное значение риска применения ТР.

Частная задача оценки РНП поставлена в виде:

$$R_{P \text{ TP}} = 1 - \int_{P^*} f(P, E) dP \leq R_P^*. \quad (2)$$

Решение частной задачи возможно с допущениями об обеспечении приемлемых значений вероятности показателей, не вошедших в (2) из (1). Приемлемым решением задачи (2) является такое ТР, для которого при применении величина РНП  $R_{P \text{ TP}}$  не превосходит заданное контрольное значение  $R_P^*$ . Так как рассмотрение ТР в контексте решаемой задачи проводится в отдельности для каждого изделия номенклатурного перечня, функция  $R_{P \text{ TP}}$  является одномерной.

На рисунке 1 представлена иллюстрация оценки РНП при решении задачи (2) для некоторого ТР, реализация которого характеризуется множеством оценок ( $P, E$ ) с границами разброса  $P_{min}, P_{max}, E_{min}, E_{max}$ , соответственно, и плотностью распределения производительности  $f(P)$ , плотность  $f(E)$  не показана. Граница приемлемости ТР по производительности определяется заданной величиной  $R_P^*$  и соответствующим значением производительности –  $P^*$ . ТР приемлемо по (2) при заданном требовании  $P_{\text{пр1}}$  с запасом производительности  $\Delta P$  и неприемлемо при требовании  $P_{\text{пр2}}$ , о чем свидетельствуют значения  $R_p(P_{\text{пр1}})$  и  $R_p(P_{\text{пр2}})$ .

Поддержка принятия ТР также предусматривает оценку экономической эффективности ТР в виде:

$$E = \frac{\Pi}{3} = \frac{\Pi \cdot \widehat{N}_\phi}{3_{const} + 3(T)} = \frac{\Pi \cdot T}{3_{об} + 3_{СТО} + \sum_{l=1}^{C_{\text{пр}}} C_{обl} \cdot T} \cdot P, \quad (3)$$

где  $\Pi, 3$  – оценки величин полезного эффекта и затрат за период времени  $\tau = T$ , соответственно, при принятии ТР;  $\Pi$  – прогнозная цена единицы продукции в

денежных единицах или ценность единицы продукции в иных единицах измерения;  $P$  – оценка фактической производительности ТК при принятии ТР, изд./период;  $\widehat{N}_\phi$  – оценка фактического объема выпуска продукции данного вида при применении ТР;  $Z_{const}, Z(T)$  – затраты на подготовку ТР к реализации и реализацию ТР для выпуска данных изделий в течение времени  $T$  соответственно;  $Z_{ob}$  – затраты на приобретаемое оборудование и запас иных инструментов и приспособлений;

$C_{ob,l}$  – показатель стоимости минуты (часа) работы станка на рабочем месте  $l$ ;  $C_{np}$  – принятное в проекте количество оборудования ТК. При фиксированных значениях параметров  $K, Z(T)$  модели, оценка  $E$  линейно зависит от  $P$ . Исследований риска по показателю  $E$  не проводится, однако, полученные значения могут использоваться при модификации ТР при уменьшении затрат на применяемые средства технологического оснащения (СТО).

Система оценки контрольных показателей РНП ( $R_p^*$ ) проекта ТК отсутствует, что потребовало разработки подхода к заданию рекомендаций. Перечень выявленных факторов может пересматриваться в зависимости от условий проектирования. На низкие контрольные значения РНП указывают: высокая ответственность продукции; крупносерийный и массовый тип производства; длительный период  $T$  оценки применения ТР; недостаточные сведения об организации производства, используемых СТО; высоких рисках потерь для предприятия и государства при невыполнении задания на проектирование. На основе опроса экспертов и анализа ТП действующих предприятий получены следующие границы допустимых значений РНП:

- не более 15 - 20% для условий крупносерийного производства, при долгосрочном прогнозировании РНП, выпуске продукции невысокой ответственности и достаточной полноте сведений об объекте проектирования и предполагаемых условиях его функционирования;

- не более 75% - при краткосрочном прогнозировании РНП, выпуске продукции невысокой ответственности в условиях единичного, мелкосерийного производства.

Фактическая производительность ТК зависит и от иных причин, не связанных с внедряемой технологией. Такие причины трудно прогнозируемые и, поэтому не учитываются при проектировании ТК по различным соображениям, а их анализ требует дополнительных объемов работ. Отсутствие возможности наблюдений на действующем производстве определяет необходимость использования иных

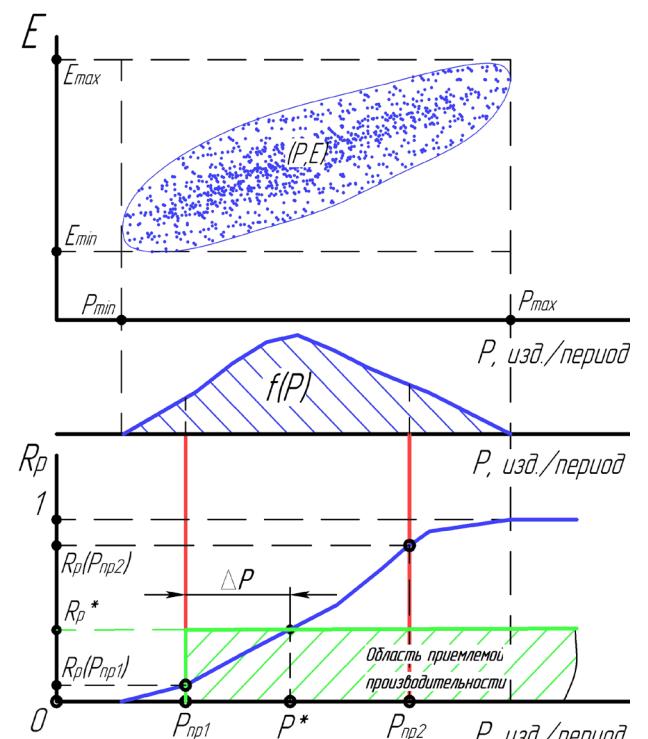


Рисунок 1. Статистическая оценка производительности ТК при применении ТР

источников данных о потерях времени работы оборудования. Частично решение данной задачи может опираться на информацию из ТП: данные об оценках времени выполнения ТО и данные анализа точности ТО.

При расчете количества оборудования необходимо использование наиболее достоверной оценки времени ТО, учитывающей неизбежные, внутрицикловые потери времени. По данным технологической документации, наиболее достоверно, в силу наименьшего количества случайных слагаемых и возможности их проверки, может быть получена оценка оперативного времени и ее составляющих – основного и вспомогательного времени. Тогда задача расчета количества оборудования, необходимого для реализации ТП и формирования графа ТК (рис. 2) будет иметь вид:

$$C_{pj} = \frac{t_{\text{оп}j} \cdot N_{\text{пр}}}{k_{\phi} \cdot \Phi_{\text{д}} \cdot K_{\text{ЭИ}}} = P_{\text{пр}} \cdot \frac{t_{\text{оп}j}}{K_{\text{ЭИ}}}; C_{nj} = [C_{pj}], \quad (4)$$

где  $\Phi_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд времени работы оборудования, час.;  $k_{\phi}$  – коэффициент приведения периода оценки производительности  $T$  к фонду времени  $\Phi_{\text{д}}$ ;  $K_{\text{ЭИ}}$  – коэффициент экстенсивного использования оборудования;  $N_{\text{пр}}$  – объем выпуска по заданию на проектирование;  $C_{pj}, C_{nj}$  - значения расчетного и принятого количества оборудования, соответственно, на операции  $j$ .

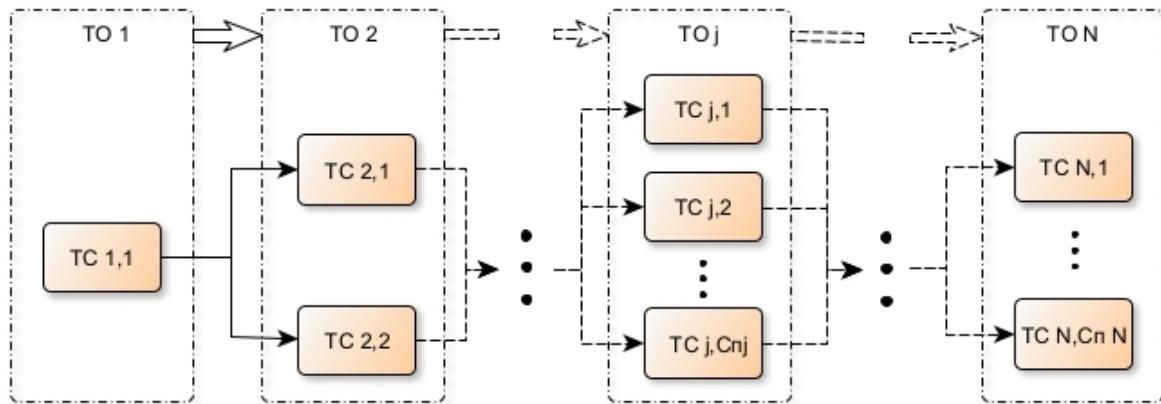


Рисунок 2. Вид графа ТК

При интервальных оценках величин  $t_{\text{оп}j}$  и  $K_{\text{ЭИ}}$  область возможных решений задачи (4) приведена на рисунке 3. Область допустимых значений количества оборудования ограничена кривыми, соответствующими границам рационального использования оборудования, его возможного принятого количества и физической возможности реализации ТО –  $t_{\text{on min}}^*, t_{\text{on max}}^*$  и  $K_{\text{ЭИ min}}^*, K_{\text{ЭИ max}}^*$  соответственно. Проектная оценка  $K_{\text{ЭИ}}$ , учитывающая только время нахождения оборудования в рабочем состоянии, может быть получена по следующей зависимости:

$$K_{\text{ЭИ}} = 1 - \frac{T_{\text{пр}}^{\Sigma}}{k_{\phi} \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{пр}}^{\Sigma}$  - оценка суммарного времени простоев оборудования, включая подналадки ТС и иные составляющие штучного или штучно-калькуляционного времени.

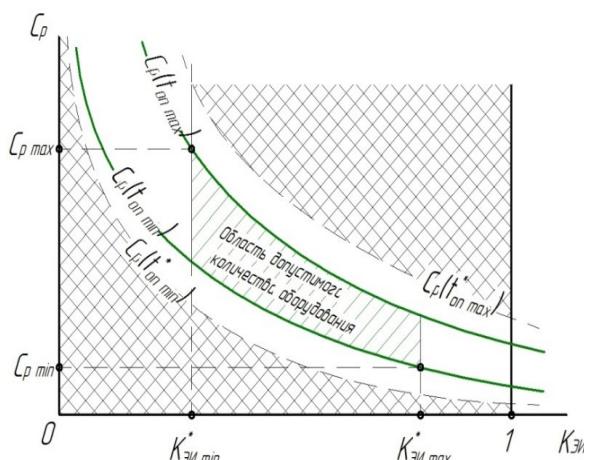


Рисунок 3. Область допустимых решений задачи расчета количества оборудования

получены с применением метода теоретических диаграмм точности обработки при заданных пороговых значениях вероятности возникновения брака  $P_{\delta \min}$ ,  $P_{\delta \max}$ , на основе анализа изменения суммарной погрешности обработки со средним значением  $\bar{\Delta}_{\Sigma}$  и границами рассеяния  $\Delta_{\Sigma}^{\min}$ ,  $\Delta_{\Sigma}^{\max}$  во времени, а также с учетом определяющих ее постоянных, функциональных и случайных элементарных погрешностей (рис. 4). Время подналадки ТС, в свою очередь, может быть определено на основании данных о порядке действий и применяемых при подналадке СТО, с использованием справочных данных о нормах времени. Построение диаграмм точности может проводиться, в том числе, на основе данных, полученных при имитационном моделировании ТО или с использованием данных натурных экспериментов. Для иных простоев ТС данные могут быть получены, в том числе, из опроса экспертов, а также в результате мониторинга состояния оборудования

действующих

предприятий. Полученные границы интервала времени между отказами (простоями) оборудования могут использоваться при моделировании для задания вида распределения ( $f(t_{\text{пп}})$ ), рис. 4). Данные о простоях ТС позволяют сформировать сценарий отказов и простоев ТС – структурированный набор данных, содержащий сведения о причине возникновения отказа или простоя оборудования, времени между отказами или простоями –  $t_{\text{пп}}$ , а также продолжительности простоев –  $t_{\text{пп}}$ . Параметры сценариев используются для задания потоков отказов оборудования при моделировании, предполагается взаимная независимость потоков отказов.

Следует заметить, что также возможно использовать коэффициенты загрузки и использования, а также показатели штучного и штучно – калькуляционного времени, при этом оценка величины  $T_{\text{пп}}^{\Sigma}$  должна учитывать виды простоев, обеспечивающих сходимость баланса времени работы оборудования.

Суммарное время простоев не может быть оценено исключительно по данным ТП. Частично, для параметрических отказов ТС, данные об интервале времени между отказами ТС ( $t_{\text{пп} \min}; t_{\text{пп} \max}$ ) в пределах интервала ( $t_1; t_2$ ) могут быть

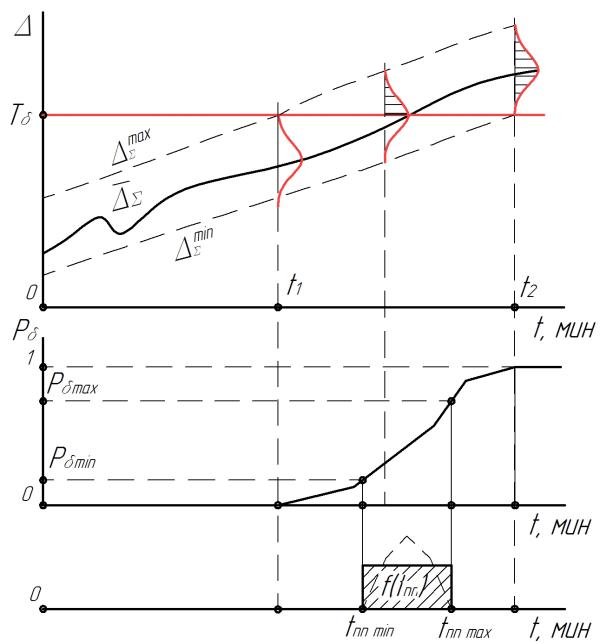


Рисунок 4. Диаграмма точности обработки

Адекватность сценария отказов и простоев для каждой ТС может быть проверена по статистической оценке риска неприемлемых значений  $R_{\text{КЭи}}$ :

$$R_{\text{КЭи}}(K_{\text{ЭИ} \min}^*, K_{\text{ЭИ} \max}^*) = 1 - \int_{K_{\text{ЭИ} \min}^*}^{K_{\text{ЭИ} \max}^*} f(K_{\text{ЭИ}}) dK_{\text{ЭИ}} \leq R_{K_{\text{Эи}}}^*, \quad (6)$$

где  $R_{K_{\text{Эи}}}^*$  – пороговое значение вероятности неприемлемых оценок  $K_{\text{ЭИ}}$  по принятому сценарию на основе данных об интервале возможных значений  $K_{\text{ЭИ} \min}^*, K_{\text{ЭИ} \max}^*$  по данным действующих предприятий. Из неприемлемости сценария отказов и простоев ТС по (6) следует необходимость его пересмотра. Адекватные сценарии могут использоваться для оценки производительности ТК.

В Главе 3 представлено решение *второй задачи* диссертации – на основании сформированного общего подхода разработан метод выбора ТР. Установлено, что формирование и поддержка сквозного процесса оценки РНП при сложной информационной модели данных, может быть рационально организована с учетом интеграции средств цифрового оснащения предприятия, используемых при технологической подготовке производства, мониторинге состояния оборудования, а также систем документооборота предприятий и сред имитационного моделирования. Схема реализации метода выбора ТР представлена на рисунке 5.

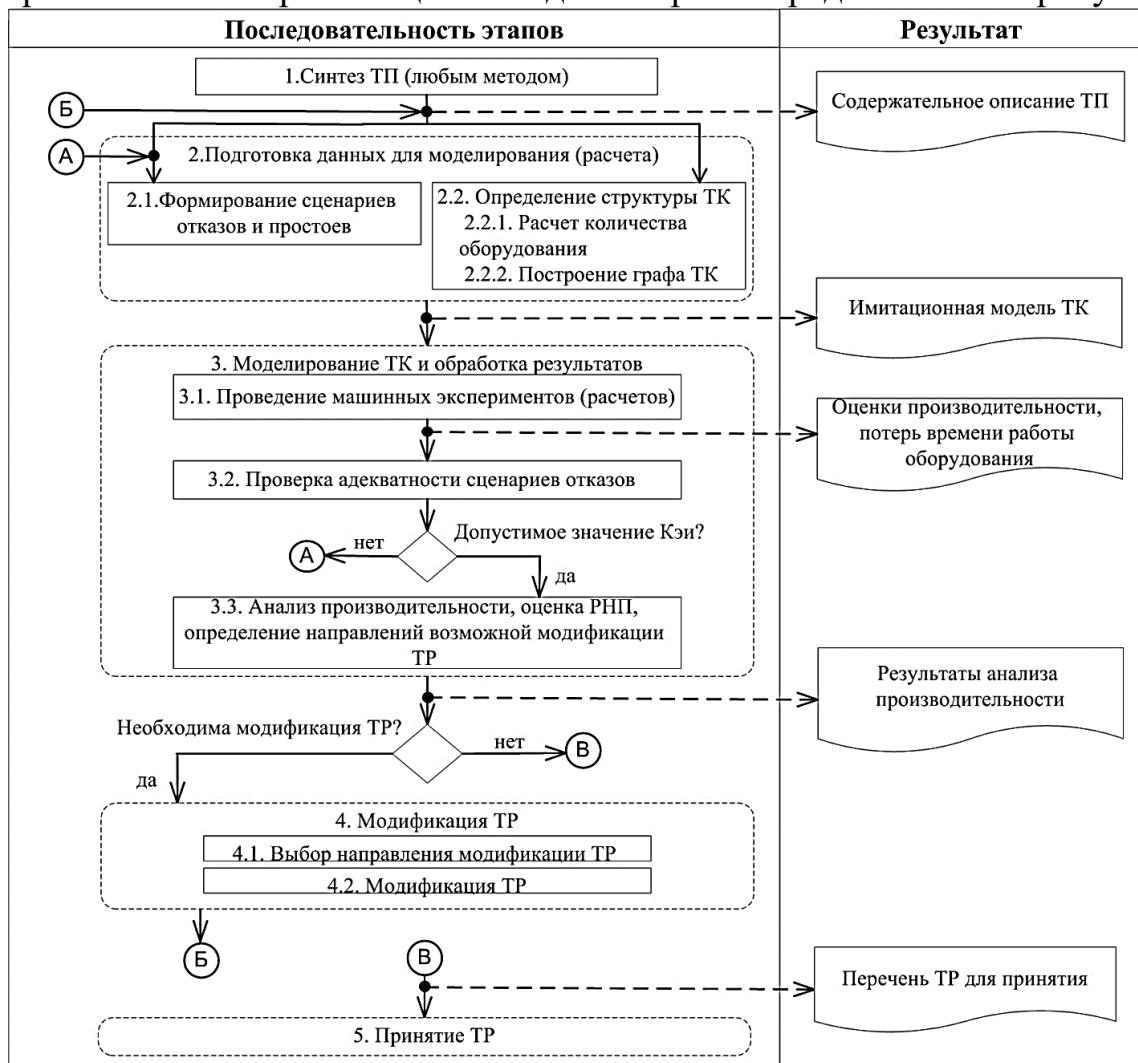


Рисунок 5. Схема метода выбора ТР применительно к условиям проектирования

**В Главе 4** решена *третья задача* диссертации и приведены результаты применения предлагаемого метода в типовых задачах: задача определения времени до отказа ТС (в составе п.2.1), задача сравнения ТР (п.2 – п.3 метода), задача оптимизации режимов обработки (п.4). Решение задач продемонстрировано на примере ТП изготовления тел вращения.

4.1. *Задача определения времени до отказа ТС по данным ТП* является основой для определения времени между отказами ТС, задаваемыми в сценарии отказов и простоев. Время между отказами ТС может быть получено при решении задачи с различными начальными условиями. При задании параметров сценариев источники информации должны документироваться для последующей верификации сценария по результатам оценки его адекватности, а также для определения и уточнения перечня корректирующих мероприятий.

Задача рассмотрена на примере многопроходной токарной обработки шейки вала из стали 30 и решена на основе данных, полученных из опубликованных источников, что характерно для ситуаций, в которых проведение натурных экспериментов или имитационного моделирования ТО невозможно. Исходными данными являлась часть технологической документации, включая управляющую программу для токарного станка с ЧПУ. Решение задачи базировалось на анализе причин возможного отказа ТС с построением дерева отказов и диаграмм точности обработки с последующим определением интервала времени до отказа ТС по функции вероятности отказа и заданным значениям вероятности отказа.

В ходе анализа возможных отказов ТС рассмотрены следующие причины: разрушение пластин при достижении износа по задней поверхности  $h_z^* = 0,2\text{--}0,3$  мм (радиального износа  $h_r \approx 0,02\text{--}0,037$  мм) – функции  $P_1(\tau)$ ,  $P_3(\tau)$ ; выход выполняемых размеров  $\Delta_D$  за пределы полей допусков по технологической документации – функции  $P_2(\tau)$ ,  $P_4(\tau)$  (рис. 6).

Функции распределения вероятности отказа ТС вычислены на основе диаграмм износа инструмента  $h_r(\tau)$  и точности обработки  $\Delta_D(\tau)$ . При построении диаграмм использованы и обработаны справочные данные об износе пластин, о жесткости элементов ТС и погрешности настройки инструментов. При решении приняты допущения, в том числе: о равновероятном распределении времени до отказа ТС; о взаимной независимости причин возможных отказов ТС, что инвариантно дереву отказов с логическим условием «или» и несовместными событиями. Пороговые значения вероятности отказа ТС приняты 0 и 1, соответственно. С учетом принятых допущений вероятность отказа определена по следующей зависимости:

$$P_{\Sigma}(\tau) = \sum P_i(\tau) \quad (7)$$

4.2. *Задача проектной оценки РНП ТК* изготовления тел вращения из стали 11ЮА решена в ситуации сравнения ТР при проектировании с целью обеспечения объема выпуска продукции  $N=25000$  шт. в течение года ( $\Phi_d=120000$  мин). Базовое ТР (ТР1) предполагает реализацию ТП и использование универсального оборудования и многошпиндельных токарных полуавтоматов; проектное ТР (ТР2)

предполагает концентрацию технологических переходов и использование токарных обрабатывающих центров с ЧПУ.

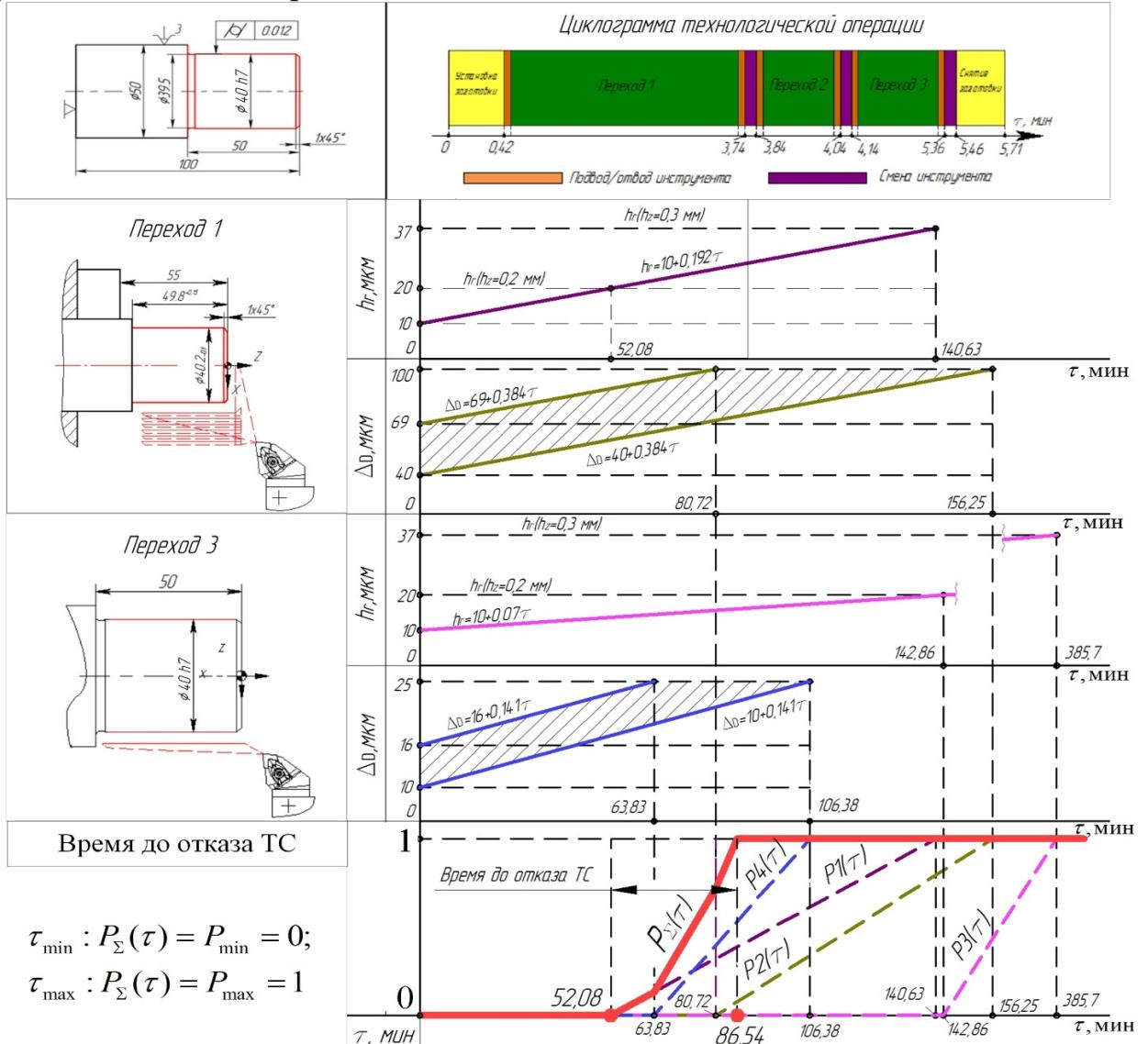


Рисунок 6. Результаты определения времени до отказа ТС

При сравнении ТР требуется:

- 1) Получить проектные оценки реализации ТР в пространстве принятых критериев производительности и экономической эффективности ( $P, E$ ).
- 2) Сравнить оценки РНП для ТР ( $R_P$ ) по заданию на проектирование при использовании ограниченного количества машинных экспериментов и при реализации серии статистических экспериментов, с оценкой адекватности сценариев по  $R_{\text{Эи}}^* \leq 0,5$  при  $K_{\text{ЭИ min}}=0; K_{\text{ЭИ max}}=0,85$ ;
- 3) Сравнить запасы производительности ТК при заданной величине допустимого РНП,  $R_P^* = 0,15$ ;
- 4) Определить возможные направления первоочередной модификации ТР1 в случае отсутствия возможности или отказа от реализации ТР2.

Необходимые данные о затратах, связанных с реализацией ТР, известны. Размер партии заготовок принят 300 шт. На основе данных предприятий-аналогов сформированы сценарии отказов и простоев ТС. В качестве доминирующих причин отказов и простоев ТС выделены подналадки ТС, организационные простои и выход

оборудования из строя. Параметры сценариев отказов и простоев ТС (границы интервалов рассеяния) приведены в таблице 1. На основе полученных данных в среде моделирования Anylogic построена дискретно - событийная имитационная модель ТК.

Организация машинных экспериментов предполагала сбор данных показателей  $P$  и  $K_{ЭИ}$  при ограниченной серии экспериментов, а также серии статистических экспериментов. Ограниченные эксперименты проведены с настройкой параметров сценариев, определяющих наихудшее (минимальное время между отказами и максимальное время восстановления) и наилучшее использование оборудования. При обработке данных приняты допущения о равновероятном и нормальному распределении  $P$  и  $K_{ЭИ}$  и соответствии их граничных значений границам  $\pm 3\sigma$  и  $\pm 1,73\sigma$  (для равномерного распределения) доверительных интервалов. Серия статистических экспериментов проведена в допущении о равновероятном распределении параметров сценариев в пределах заданных границ интервалов. Объем статистических экспериментов определялся по точности оценки средних значений  $P$  и  $K_{ЭИ}$  (95% доверительный интервал): не более  $\pm 1\%$  - для среднего значения  $P$ ; не более  $\pm 2,5\%$  – для среднего значения  $K_{ЭИ}$ .

Таблица 1. Исходные данные задачи 4.2 и данные анализа простоев оборудования

Эскиз детали								
Маршрут	Модель оборудования	$t_{оп}$ , мин	Время между отказами/простоями, мин ( $t_{пп min}, t_{пп max}$ )			Время восстановления, мин ( $t_{пп min}, t_{пп max}$ )		
			Организационные	Наладка	Выход из строя, мин $\times 10^{-3}$	Организационные	Наладка	Выход из строя, мин $\times 10^{-3}$
<b>Базовый вариант ТП (TP 1)</b>								
010 Токарная	1И611П	1	(90;300)	(50;70)	(10;25)	(10;20)	(7;15)	(0,4;1)
020 Автоматная токарная	1Б265П-6К	1,7	(50;70)	(200;450)	(10;50)	(5;10)	(10;50)	(0,24;1,5)
030 Автоматная токарная	1Б265П-6К	1,7	(50;70)	(200;450)	(10;50)	(5;10)	(10;50)	(0,24;1,5)
040 Бесцентрово-шлифовальная	3Е184ВМ	0,3	(50;70)	(120;240)	(12;30)	(5;10)	(15;45)	(0,48;1,6)
050 Токарная	1И611П	2,5	(90;300)	(50;70)	(10;25)	(10;20)	(10;35)	(0,4;1)
<b>Проектный вариант ТП (TP 2)</b>								
010 Токарная с ЧПУ	Обрабатывающий центр	9,7	(50;70)	(200;240)	(50;70)	(5;10)	(10;30)	(0,35;1,5)
040 Бесцентрово-шлифовальная	3Е184ВМ	0,3	(50;70)	(120;240)	(10;40)	(5;10)	(15;45)	(0,4;1)

Результаты оценки ТР в принятых критериях и РНП приведены на рисунке 7. Большие разбросы оценок ( $P, E$ ) соответствуют результатам ограниченной серии экспериментов, которые показали превышение допустимого РНП по требованиям проекта для ТР1, при допущениях о равновероятном ( $R_P'' \approx 0,37$ , точка  $A''$ ) и нормальном распределении ( $R_P' \approx 0,2$ , точка  $A'$ ) производительности, а также

неадекватность сценария отказов и простоев ТС для оборудования с ЧПУ (операция 010 ТР2,  $R'_{\text{Кэи}} \approx 0,6$ , рис.8), что определило необходимость уточнения результатов и проверки адекватности сценариев при проведении статистических экспериментов.

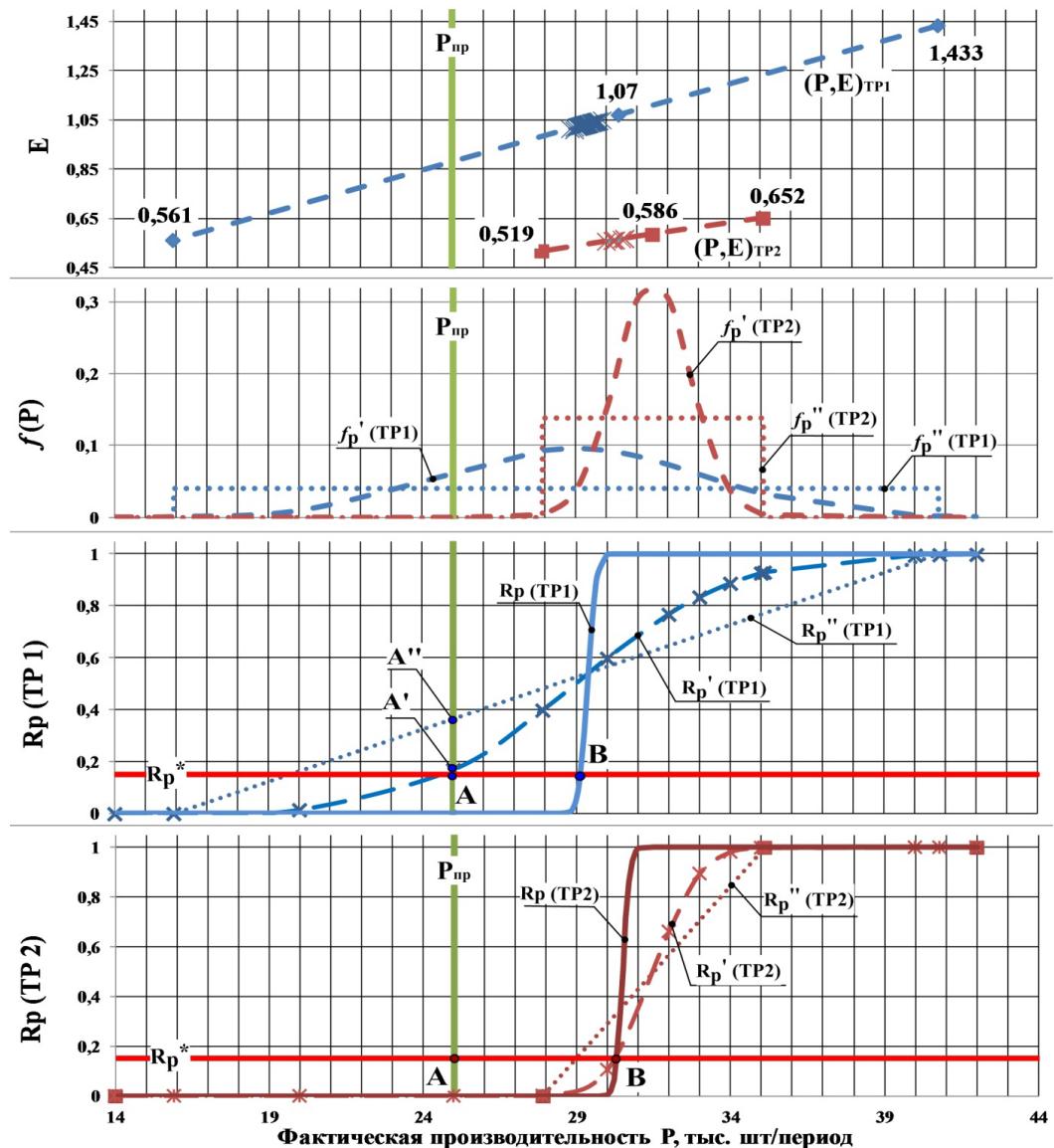


Рисунок 7. Результаты экспериментальной оценки ТР и РНП

Проведение 50 статистических экспериментов показало достижение требуемой точности оценок  $P$ , Кэи и приемлемость аппроксимации  $R_P, R_{\text{Кэи}}$  кривыми нормального распределения с вероятностью ошибки первого рода  $\alpha=0,05$  по критерию Пирсона; адекватность сценариев отказов и простоев ( $R_{\text{Кэи}} \approx 0$ , рис.8). Плотность распределения  $f(P)$  для оценок ТР по статистическим экспериментам на рисунке 8 не показана. На основании полученных данных проведена оценка запаса производительности (отрезки  $AB$ , рис.7). Выявленные запасы обусловлены возможностью повышения загрузки оборудования в принятом количестве при принятых параметрах сценариев, и составляют 18% - для ТР1 и 22% для ТР2.

На основании полученных результатов можно утверждать, что допущение о равновероятном распределении производительности ( $R''_P$ , рис.8) позволяет получить оценку РНП с наибольшим запасом. Такая оценка соответствует максимальной уверенности в обеспечении производительности, однако, может являться причиной

исключения ТР из списка допустимых при сравнении ТР с оценками разной точности. Поэтому такие оценки РНП целесообразно считать предварительными.

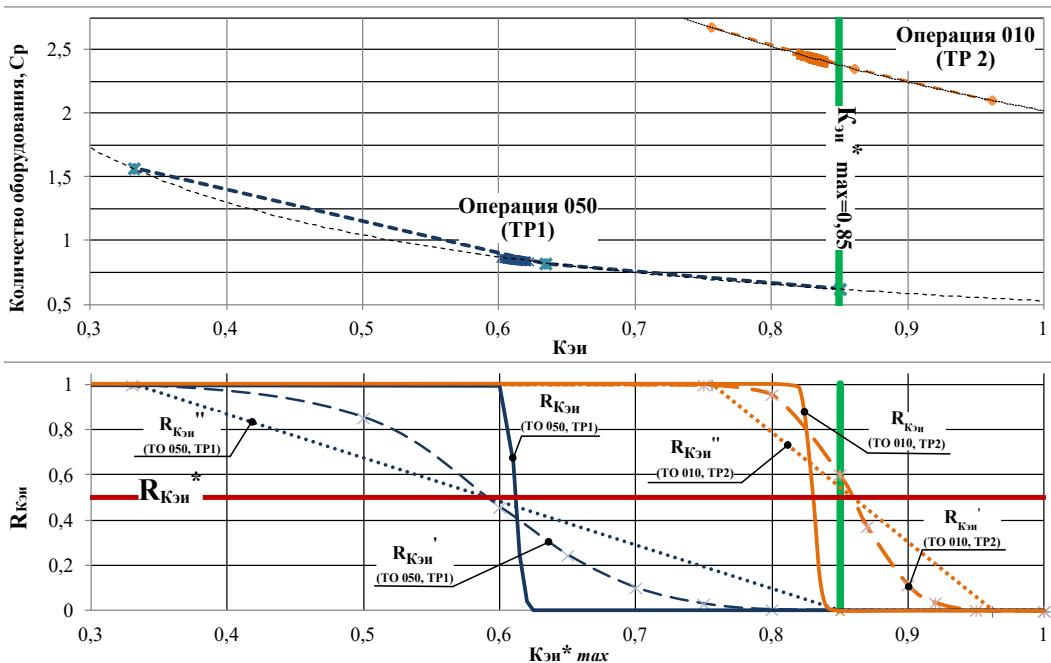


Рисунок 8. Оценка адекватности сценариев отказов и простоев

В результате ограниченной серии экспериментов установлено, что наибольшее влияние на производительность ТК при реализации ТР1 оказывает загрузка ТС операции 050 (рис. 8), что обусловлено длительными простоями ТС, что определяет первоочередное направление модификации ТР1 при отказе от ТР2. Для детализации направлений модификации проведена дополнительная серия из 9 экспериментов с настройкой параметров модели по наилучшему, наихудшему и среднему сценариям использования оборудования предшествующих ТО. Установлено, что наибольшее влияние на производительность ТК оказывает длительность подналадки ТС (рис. 9), что указывает на модификацию ТП с операции 050 по направлениям:

- уменьшение времени подналадки ТС;
- дифференциация переходов и
- формирование новых ТО.

В результате сравнения ТР установлено, что ТР2 предпочтительно по оценке запаса производительности. Традиционные методы проектирования не обеспечивают возможности обоснования выбора ТР.

**4.3. В задаче оптимизации режимов обработки** рассмотрена однопроходная токарная обработка штампованной заготовки из стали 11ЮА (рис.10, а). Оптимизация проводилась по комплексному критерию:

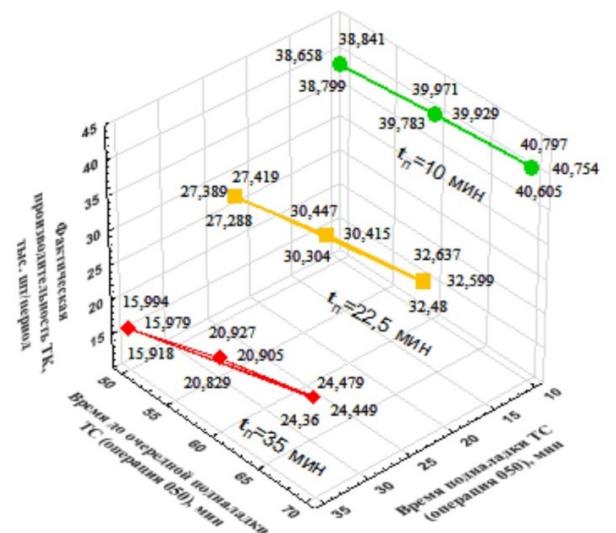
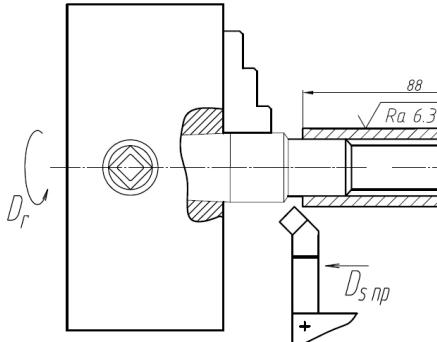


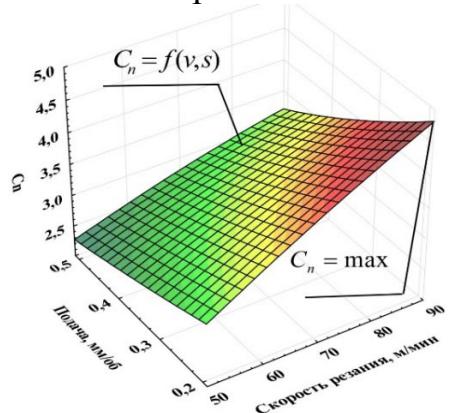
Рисунок 9. Результаты анализа производительности оборудования

$$C_n = \frac{\bar{\tau}(v,s)}{t_{\text{оп}}(v,s) \cdot \Delta\tau_{\text{пacc}}(v,s)} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где  $C_n$  – критерий оптимизации;  $t_{\text{оп}}$ ,  $\bar{\tau}$ ,  $\Delta\tau_{\text{пacc}}$  – значения показателей оперативного времени, наработки ТС между отказами и ее рассеяния, соответственно, определенные по ТП и диаграмме точности обработки.



а)



б)

Рисунок 10. Эскиз технологической операции – (а); критерий оптимизации – (б)

Критерий оптимизации (рис. 10, б) вычислен в пределах ограничений по скорости резания  $v = [55; 85]$  м/мин; подачи  $s = [0,2; 0,5]$  мм/об с глубиной резания в пределах  $t=0,25-0,55$  мм; учтены колебания предела прочности материала заготовки  $\sigma_B=588-600$  МПа. Частные критерии вычислены по алгоритму расчета точности в среде Matlab с применением справочных данных. Полученное решение позволило повысить производительность и сократить срок выполнения рассмотренной ТО на 1,5 смены при объеме заказа 3000 изделий в действующей организации за счет корректировки режимов обработки по выявленному направлению. При этом результатом изменений в ТП стало назначение следующих режимов обработки:  $n = 800$  об/мин ( $v = 86$  м/мин),  $s = 0,25$  мм/об; взамен:  $n = 500$  об/мин ( $v = 54$  м/мин); подача  $s = 0,3$  мм/об.

### Общие выводы диссертационной работы

1. В настоящий момент применение концепции управления рисками не является общепринятой в задачах проектирования ТП, при применении традиционных методов невозможно обоснование запаса производительности и изменений в ТП. Поэтому разработка метода проектирования ТП на основе статистической оценки производительности является актуальной задачей для машиностроения РФ.
2. Разработан концептуальный подход к выбору ТР на основе аналитического прогнозирования фактической производительности ТС и риска ее неприемлемых значений, который позволяет обеспечить выбор ТР с учетом процесса целенаправленного достижения точности механической обработки.
3. Разработанный метод выбора ТР и алгоритм вероятностного прогнозирования фактической производительности в задачах проектирования и управления ТП позволили:

- выявить необходимость детального анализа потерь времени работы оборудования с выделением простоев ТС на подналадку;
- вычислять время между отказами по точности обработки без проведения промышленных экспериментов;

- осуществлять выбор ТР по расчетному значению запаса производительности.

4. Реализация разработанных алгоритмов решения типовых проектных задач позволила по результатам проведенных машинных экспериментов выявить необходимость сравнения ТР по равноточным величинам РНП и применение планов экспериментов, обеспечивающих статистическую достаточность оценок производительности ТК.

5. Сравнение расчетов количества оборудования и производительности с имитационным моделированием ТК и полученное расхождение значений коэффициента экстенсивного использования не более 1% доказывает адекватность применения метода проектирования ТП на ранних этапах проектирования ТК.

6. Практическая реализация разработанного метода выбора ТР на ООО «МетМаш» позволила сократить время выполнения задания по изготовлению тел вращения с повышением производительности на 10% за счет коррекции режимов обработки с увеличением скорости резания и уменьшением подачи.

7. Результаты диссертации внедрены на предприятиях ООО «НПЦ «Кропус-ПО» и ООО «Энергомеханика», что позволило повысить производительность оборудования токарной и фрезерной группы до 15% и увеличение загрузки до 20%.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Никоноров А.И. Методика оценки производственной неопределенности при проектировании технологических комплексов механообработки // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе (17-22 сентября 2012 г.) Донецк: ДонНТУ, 2012. Т.2. С.227-229. (0,18 п.л.)

2. Никоноров А.И. Параметрическая модификация операций механической обработки при прогнозировании отказов технологических систем // Известия ТулГУ. 2015. №10. С.128-135. (0,44 п.л.)

3. Никоноров А.И. Оценка проектных технологических решений с учетом факторов внутренней производственной неопределенности // Известия ТулГУ. 2016. №7-1. С.93-103. (0,63 п.л.)

4. Никоноров А. И., Далечин А.С. Анализ риска возникновения брака, связанного с погрешностью базирования заготовок при установке в призмы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 12(753). С. 59-69. (1,16 п.л./ 0,6 п.л.)

5. Никоноров А. И., Далечин А.С. Оценка риска возникновения брака вследствие недопустимой погрешности базирования при установке жестких заготовок // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: Сб. трудов научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина (20 января 2023 года). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. С. 365-372. (0,44/ 0,25 п.л.)

6. Никоноров А.И. Оценка риска неприемлемой производительности при выборе оборудования механообрабатывающих производств // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. ISSN 2310-0818. 2023. Т.10, №1. С. 3-8. DOI: 10.24892/RJIE/20230101 (0,7 п.л.)