

На правах рукописи



**Фазилова Ксения Наильевна**

**Инструменты контроля качества технологических процессов  
интеллектуального машиностроительного производства**

Специальность 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2022

Диссертационная работа выполнена на кафедре метрологии и стандартизации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

Научный руководитель –

**Анцыферов Сергей Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты –

**Садковская Наталья Евгеньевна**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный  
институт (национальный  
исследовательский университет)»,  
профессор кафедры управления  
инновациями

**Овчинников Сергей Андреевич**  
кандидат технических наук,  
ФГУП «Всероссийский научно-  
исследовательский институт «Центр»,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация –

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Ярославский  
государственный технический  
университет»

Защита состоится «\_\_\_» 2022 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.23 при Московском государственном  
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я  
Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные 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](http://www.bmstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.



Елена Сергеевна Постникова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время к наиболее прогрессивным и гибким производственным системам относят так называемые «Умное производство», «Умная фабрика», «Производство 4.0», «Интеллектуальное производство». Интеллектуальные производственные системы предполагают объединение в единую коммуникационную сеть всех операций внутри предприятия по стадиям производства и используют методы и средства мониторинга для контроля качества и получения информационного потока данных, необходимого для адаптации к новым требованиям.

Ближайшей перспективой является создание интеллектуальных машиностроительных производств (ИМП), функционирующих исключительно под управлением искусственного интеллекта. Интеллектуальное машиностроительное производство в своей основе представляет собой совокупность взаимосвязанных технологических процессов (ТП) и машин-роботов, объединенных в сеть для эффективного функционирования и генерации необходимой для аналитики информации. К технологическим процессам предъявляются высокие требования по точности производимых изделий, а также по сверхвысокой точности в области нанотехнологий, что может быть достигнуто путем широкого использования накопленных знаний, их пополнения и эффективного использования. В соответствии с этим каждый технологический процесс (технологическая операция) должен содержать локальную систему знаний, средства накопления и обработки информации, принятия решений, а также интерфейсные средства ввода-вывода и обмена с другими процессами (операциями). Важным аспектом является своевременный доступ и обработка информации о состоянии технологического процесса, мониторинг уровня качества процесса для быстрого, в случае необходимости, его обновления и оперативной переориентации с учетом возможных интенсивных приращений знаний. В свою очередь качество технологического процесса в значительной степени определяется точностью выполнения технологических операций (ТОп), объединенных в единый технологический процесс.

В связи с этим представляется актуальным разработка инструментов контроля качества технологических процессов с учетом точности выполнения технологических операций, пополнения знаний и их использования.

### Степень разработанности проблемы

Существует целый ряд научных работ, посвященных инструментам управления качеством производственными процессами (Колобов А.А., Омельченко И.Н., Орлов А.И., Васильев В.А., Бром А.Е., Рыжикова Т.Н., Туровец О.Г., Исиакава К., Кабалдин Ю.Г., Дэминг У.Э., Шухарт У.Э. и другие).

**Цель работы** – создание научно-обоснованных инструментов (методов и алгоритмов), предназначенных для разработки методик, систем мониторинга и прогнозирования качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

## **Задачи исследований**

Достижение поставленной в диссертации цели связано с решением следующих задач:

- \* анализ инструментов контроля качества технологических процессов машиностроительного производства;
- \* определение особенностей организации интеллектуального машиностроительного производства;
- \* разработка алгоритма оценки точности технологических операций машиностроительного производства;
- \* разработка и теоретическое обоснование математической модели динамики качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства;
- \* разработка методики контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства;
- \* практическая апробация разработанной методики.

## **Научная новизна**

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- \* разработана и теоретически обоснована математическая модель динамики качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства;
- \* разработана методика контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства с оценкой как его текущего состояния, так и возможностью прогнозирования последующих состояний;
- \* разработаны метод и реализующий его алгоритм определения границ областей показателей качества технологических процессов.

**Объектом исследования** является технологический процесс интеллектуального машиностроительного производства.

**Предметом исследования** является контроль качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

## **Положения, выносимые на защиту:**

- \* математическая модель, описывающая динамику качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства, представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, связывающее вероятностные оценки точности технологических операций, интенсивности приращения и использования знаний с энтропией как мерой отложенности технологического процесса;
- \* контроль качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства основан на предварительном построении границ области качества и последующем определении текущего уровня качества технологического процесса;
- \* разработанные инструменты применимы для решения практических задач, связанных с контролем качества широкого класса технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке инструментов контроля и прогнозирования качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства, позволяющих существенно снижать себестоимость изготовления оснастки за счет своевременного ее обновления и увеличения, благодаря этому, срока ее службы, а также достижения высоких технических показателей, сопоставимых с эталонными значениями, более простыми техническими средствами.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что применение основных положений работы, заключающихся в разработанном научно-методическом подходе, методах и алгоритмах его реализации на основе использования инструментов из разных областей науки, позволяет обеспечить контроль и прогнозирование качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

### **Методы исследований**

В работе использованы методы системного анализа, методы стандартизации и управления качеством, математического и компьютерного моделирования, имитационного динамического моделирования, планирования экспериментов.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность разработанной методики определяется апробацией и использованием:

1. При контроле качества технологического процесса изготовления лопаток газотурбинных двигателей на АО «ОДК-Пермские моторы».
2. При контроле качества технологического процесса калибровки эталонных мер нанометрии на предприятии АО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума».
3. В учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международные научно-технические конференции INTERMATIC-2016, INTERMATIC-2017, INTERMATIC-2018, г. Москва, 2016, 2017, 2018; II Международная конференция «APITECH-II - 2020: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг». г. Красноярск, 2020; IV Международная научно-практическая конференция «САПР и моделирование в современной электронике». г. Брянск, 2020; II Международная конференция «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». г. Красноярск, 2021; III Международная конференция «MIP: Engineering-III-2021: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации». г. Красноярск, 2021; III Международная конференция «APITECH-III - 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг». г. Красноярск, 2021; V Международная научно-практическая конференция «САПР и моделирование в

современной электронике». г. Брянск, 2021; III Международная конференция «MIP: Engineering-III-2021: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации». г. Красноярск, 2021; XXV Всероссийский семинар «Нейроинформатика, её приложения и анализ данных», г. Красноярск, 2017; Российская научно-техническая конференция с международным участием «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». г. Москва, 2018, 2019, 2020, 2021; IV и V Всероссийские Поспеловские конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы». г. Калининград, 2018, 2020; III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практической деятельности». г. Архангельск, 2019 г.; XXI, XXII и XXIII Всероссийский семинар «Моделирование неравновесных систем». г. Красноярск, 2018, 2019, 2020; XXIV Всероссийский семинар «Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем». г. Красноярск, 2021.

### **Соответствие паспорту специальности**

Представленные в диссертационной работе исследования и разработки соответствуют пунктам паспорта специальности 05.02.22 – Организация производства (машиностроение).

5. Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем. Повышение качества и конкурентоспособности продукции, системы контроля качества и сертификации продукции. Системы качества и экологичности предприятий.

10. Разработка методов и средств мониторинга производственных и сопутствующих процессов.

11. Разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

**Личный вклад** автора заключается в непосредственном участии в разработке основных положений, выносимых на защиту, разработке методики контроля качества технологических процессов и практической апробации этой методики.

### **Публикации**

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в одиннадцати работах, из них четыре статьи в журналах, индексируемых Scopus, шесть статей в журналах списка ВАК РФ, одна статья, индексируемая РИНЦ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертации, определены цели и задачи диссертационного исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** определены основные показатели качества технологических процессов машиностроительного производства, проведен обзор методов контроля этих показателей. Определены особенности организации

интеллектуального машиностроительного производства, дана постановка научной задачи.

При оценке качества технологических процессов исходят, как правило, из значительной сложности их природы, объединяющей в себе технологические, экономические и организационные показатели.

Статистические методы позволяют осуществлять операционный контроль (мониторинг) качества технологического процесса и его изменения под действием различных факторов: износ оборудования технологической оснастки и инструмента, старение, температурные деформации. Реализация операционного контроля позволяет выявить ухудшение качества уже на ранних стадиях и своевременно устранить причины ухудшения.

Суммарное влияние всех случайных факторов, возникающих в ходе технологического процесса, вызывает рассеяние параметров качества обрабатываемых заготовок, а величина этого рассеяния характеризует точность (качество) процесса.

Уровень автоматизации технологического процесса – характеризует научно-технический уровень процесса, его производительность, а также стабильность качества изделий, т.к. автоматизация существенно уменьшает степень воздействия обслуживающего персонала на процесс, его вмешательство в ход процесса.

В настоящее время существуют компьютерные системы, функцией которых является контроль и управление технологическим оборудованием, исполнительными устройствами и различными механизмами. Примером такой системы может служить SCADA (Supervisory control and data acquisition) – диспетчерский контроль и накопление данных.

Четвертая промышленная революция связана прежде всего с созданием так называемых цифровых заводов (интеллектуального машиностроительного производства) на основе технологий промышленного Интернета вещей, трехмерной печати металлом на основе цифровых моделей, комплексной роботизации производства и аналитики больших данных (Big Data). Организация интеллектуального машиностроительного производства предполагает, что каждая единица оборудования способна к самостоятельной настройке параметров производства в ходе взаимодействия с другим оборудованием, подключенным к общей базе знаний. Кроме того, организация интеллектуального машиностроительного производства предполагает всестороннюю визуализацию производственных (технологических) процессов, позволяющую установить четкие причинно-следственные связи при мониторинге каждой стадии производства (технологического процесса), контролировать качество, быстро обнаруживать проблемы и устранять их.

Организационная структура интеллектуального машиностроительного производства (Рисунок 1) строится на основе накопленной базы знаний в обусловленной сфере производства с ее пополнением как из внешних источников, так и за счет приобретения собственного опыта.

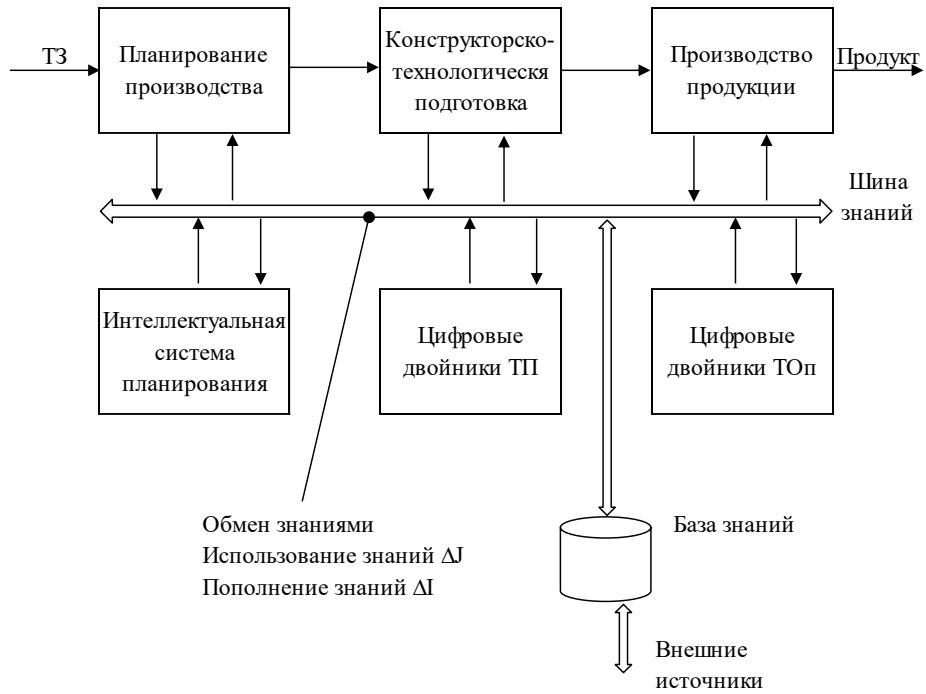


Рисунок 1. Структурная схема организации ИМП

Для контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства необходимы инструменты, обеспечивающие возможность получения интегральной оценки качества ТП, учитывающей точность выполнения технологических операций при условии непрерывного пополнения и адекватного использования знаний.

**Во второй главе** разработаны алгоритм оценки точности технологических операций машиностроительного производства, математическая модель динамики качества, методика контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

Наиболее достоверную оценку реальной точности обработки заготовок на той или иной операции дает метод статистического анализа результатов измерений контролируемого размера. Практическая реализация данного метода может осуществляться с помощью следующего алгоритма:

1. Установка контролируемого размера

$$A_{-\Delta 2}^{+\Delta 1}, \Delta 1 \text{ и } \Delta 2 \text{ – допуски на размер.} \quad (1)$$

2. Измерение контролируемого размера у  $n$  заготовок –  $\{a_i\}, i = \overline{1, n}$

3. Оценка статистических показателей

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum a_i, i = \overline{1, n} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (a_i - \bar{a})^2}{n-1}}, i = \overline{1, n} \quad (3)$$

$\omega=6\sigma$  – поле рассеивания размера.

Если  $\omega>\Delta$ , то неизбежен брак.

4. Определение квантилей нормального распределения

$$t_B = \frac{|a_B - \bar{a}|}{\sigma} = \frac{|(A + \Delta 1) - \bar{a}|}{\sigma} \quad (4)$$

$$t_H = \frac{|a_H - \bar{a}|}{\sigma} = \frac{|(A - \Delta 2) - \bar{a}|}{\sigma} \quad (5)$$

В случае прецизионных измерений вместо  $\bar{a}$  используется действительное значение измеряемого размера.

5. Определение табличных значений функций Лапласа (интервала вероятностей)

$$\Phi(t_b); \Phi(t_h) \quad (6)$$

6. Определение вероятностных показателей:

\* вероятность брака по верхнему пределу поля допуска

$$P_{\delta.b.} = [0,5 - \Phi(t_b)] \quad (7)$$

\* вероятность брака по нижнему пределу поля допуска

$$P_{\delta.n.} = [0,5 - \Phi(t_h)] \quad (8)$$

\* вероятность точности операции по полям допуска

$$P_{TB} = 1 - P_{\delta.b.}; P_{TH} = 1 - P_{\delta.n.} \quad (9)$$

7. Определение вероятности точности технологической операции

$$P = \frac{P_{TB} + P_{TH}}{2} \quad (10)$$

Полученные вероятностные оценки точности технологических операций с учетом их взаимосвязанности позволяют в качестве меры отложенности технологического процесса использовать энтропию

$$H = H_1 + H_2 = - \sum_i P_i \log P_i - \sum_i \sum_j P_{ij} \log P_{ij}, \quad i, j = 1, N \quad (11)$$

где  $P_i$  – вероятностная оценка точности ТОп,

$P_{ij}$  – вероятностная оценка взаимосвязи между ТОп.

Изменение отложенности технологического процесса во времени в силу воздействия ряда случайных факторов будем описывать с помощью уравнения, характеризующего изменение энтропии за время  $\Delta t$  пропорциональное ее значению в момент времени  $t$ :

$$\frac{dH}{dt} = KH, \quad (12)$$

где  $K = \Delta I - \Delta JH$  – коэффициент пропорциональности;

$\Delta I$  – пополнение (приращение) знаний;

$\Delta J$  – использование знаний.

Тогда

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = (\Delta I - \Delta J H)H = \Delta I H - \Delta J H^2 \quad (13)$$

Последнее соотношение представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, которое будем рассматривать как математическую модель динамики качества ТП. Решение уравнения (13) позволяет отслеживать тенденции изменения качества процесса в зависимости от точности выполнения ТОп, приращения знаний и их использования.

Для отслеживания тенденций изменения состояний процесса, т.е. его динамики, необходимо знать в каком состоянии он находится в данный момент и в каком направлении меняется при этом его энтропия.

Согласно методу Ляпунова, определение состояния процесса сводится к определению знака выражения

$$K(t) = \Delta I(t) - \Delta J(t)H(t) \quad (14)$$

Устойчивому состоянию соответствует отрицательное значение  $K(t)$ . Реальное состояние ТП ИМП характеризуется положительным значением  $K(t)$ , т.е.  $\Delta I > 0$  и  $\Delta J > 0$  (Рисунок 2). Для такого (отложенного) ТП характерны следующие параметры:

$$\frac{dH}{dt}(t) < 0, K(t) > 0 \quad (15)$$

Это означает, что, находясь в состоянии отложенности, за счет воздействия случайных факторов, возможны, в некоторых пределах, девиации показателя качества.

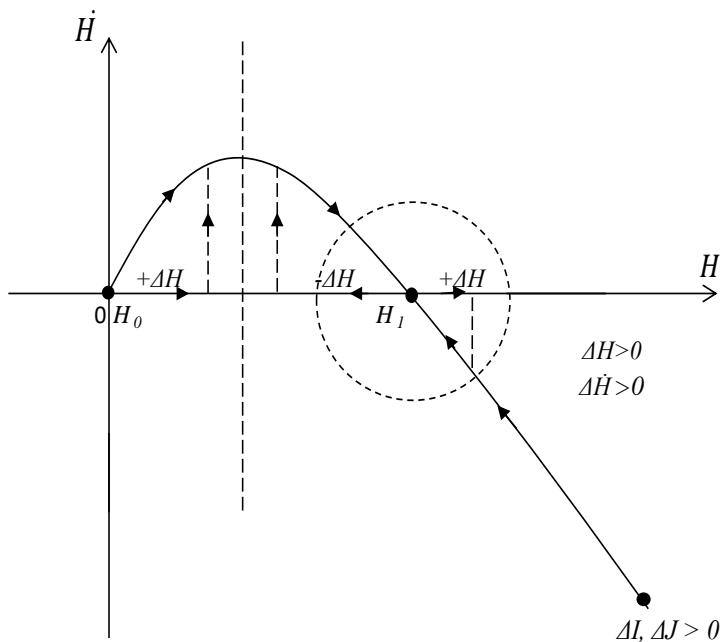


Рисунок 2. Отложенный ТП

Возможна ситуация, когда  $\Delta I > 0$ ,  $\Delta J = 0$ , возникающая за счет целого ряда причин (износа оборудования, старения, несоответствия современному уровню знаний и т.д.). В этом случае  $\Delta H > 0$ ,  $\dot{H} > 0$ , что может привести к разладке ТП (Рисунок 3).

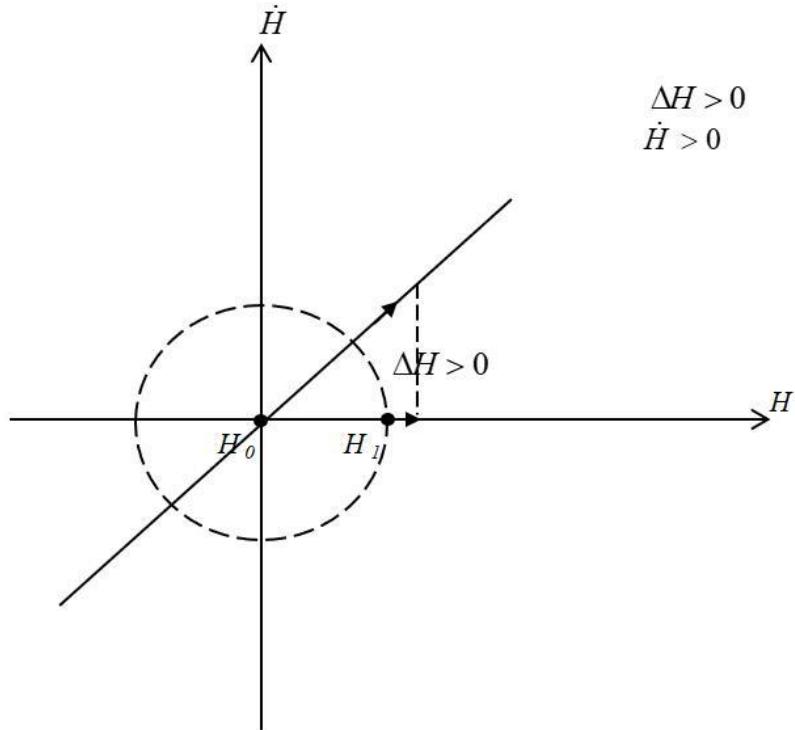


Рисунок 3. Разладка ТП

На основании полученных соотношений разработан алгоритм построения граничных значений области качества ТП.

*Алгоритм построения границ области качества* состоит из следующих операций:

- \* Установление интервала допустимых вероятностей точности ТОп  $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ .
- \* Построение функциональных зависимостей  $H = f(N, P)$  для заданных значений вероятностей ( $P_{max}$ ,  $P_{min}$ ) и для установленного числа ТОп ( $N$ ) согласно соотношению (15).
- \* Определение интервала  $\Delta H$ .
- \* Построение фазовой диаграммы, описывающей состояние ТП для случая  $\Delta I > 0$ ,  $\Delta J > 0$ .
- \* Определение интервальных значений  $\Delta \dot{H}$ .

*Методика контроля качества ТП* включает в себя построение границ областей качества согласно приведенному алгоритму и разработанный алгоритм оценки реального показателя качества процесса.

*Алгоритм оценки реального показателя качества.* Алгоритм состоит в определении текущих значений вероятностных оценок точности технологических операций и соответствующих значений  $H$ ,  $\dot{H}$  (точка показателя качества). В случае «выхода» точки за пределы установленных граничных значений области качества поступает сигнал на блок принятия решений и, в случае необходимости, осуществляется обновление технологической оснастки (Рисунок 4).

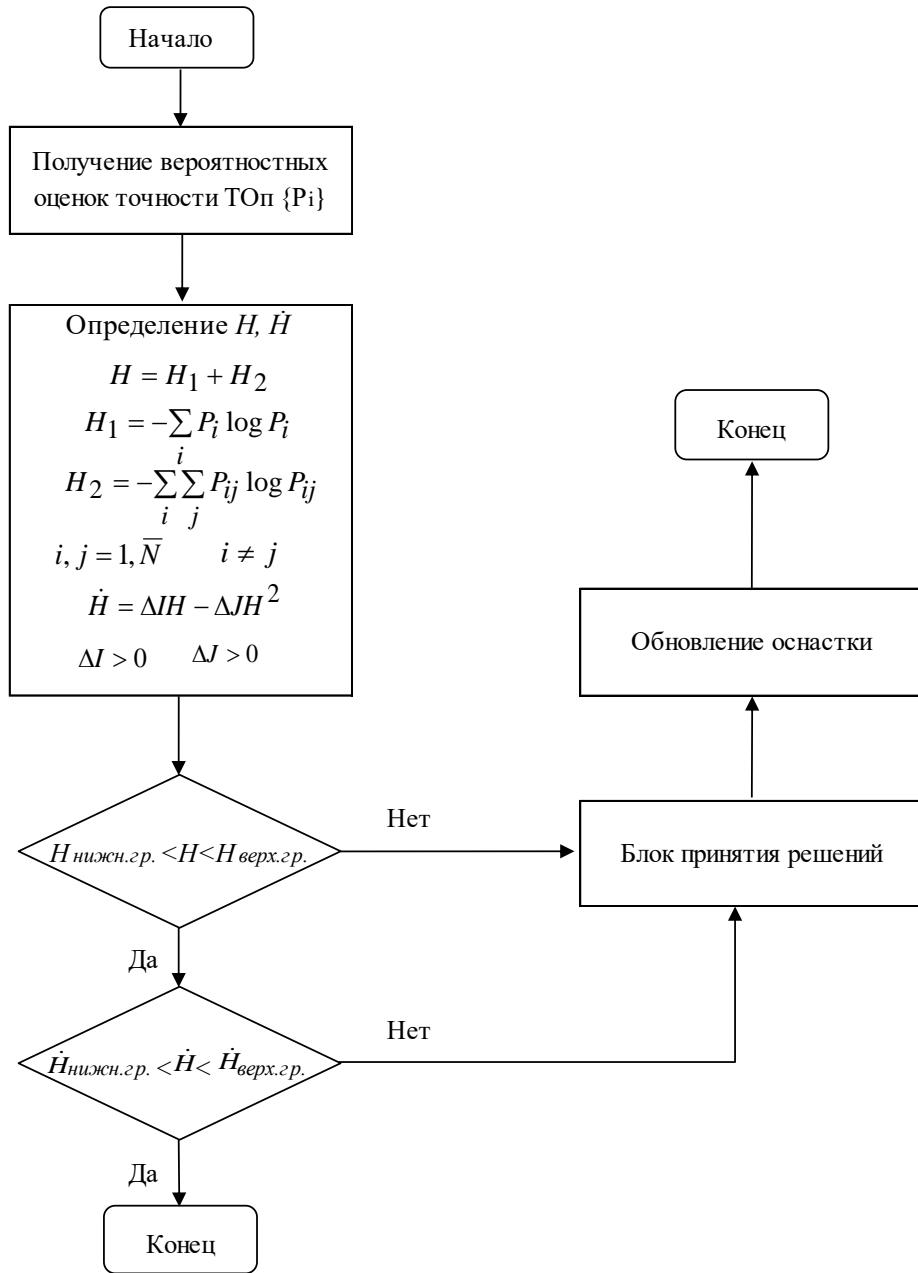


Рисунок 4. Структурная схема алгоритма оценки реального показателя качества  
**Третья глава** посвящена практической апробации разработанной методики контроля качества технологических процессов.

Контроль качества технологического процесса изготовления лопаток газотурбинных двигателей на АО «ОДК-Пермские моторы». «ОДК-Пермские моторы» является производителем лопаток газотурбинных двигателей. Технологический процесс производства лопаток газотурбинных двигателей состоит (Рисунок 5) из ряда операций, между которыми в процессе функционирования происходит обмен знаниями.

ТОп<sub>1</sub> – проектирование 2D-модели лопатки (Рисунок 6);

ТОп<sub>2</sub> – проектирование 2D-модели штампа;

ТОп<sub>3</sub> – изготовление штампа;

ТОп<sub>4</sub> – контроль геометрии штампа с помощью шаблонов и измерительного оборудования;

ТОп<sub>5</sub> – слесарная доработка штампа в случае несоответствия его геометрии установленным требованиям;

ТОп<sub>6</sub> – изготовление лопатки методом высокоскоростной точной штамповки;

ТОп<sub>7</sub> – контроль геометрии лопатки.

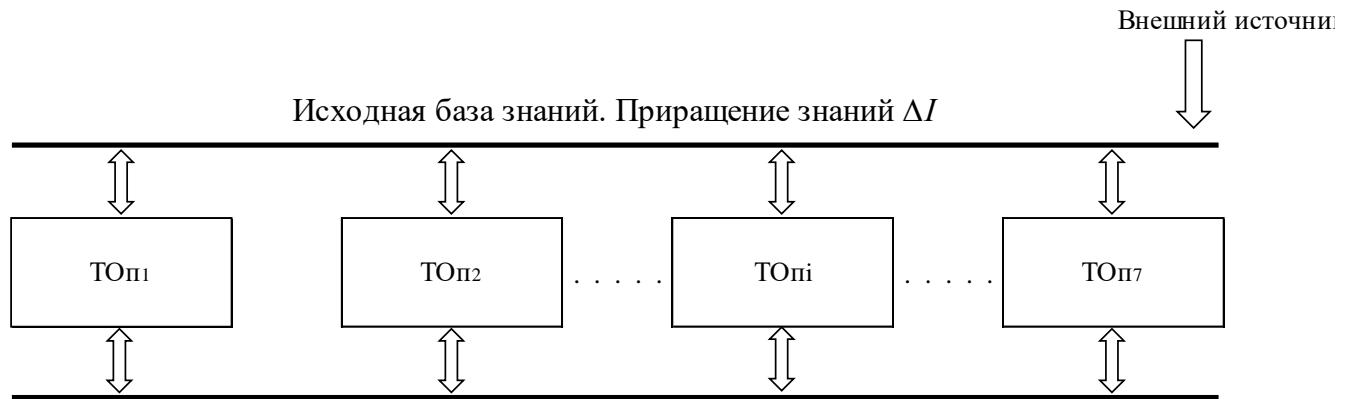


Рисунок 5. Структурная схема технологического процесса

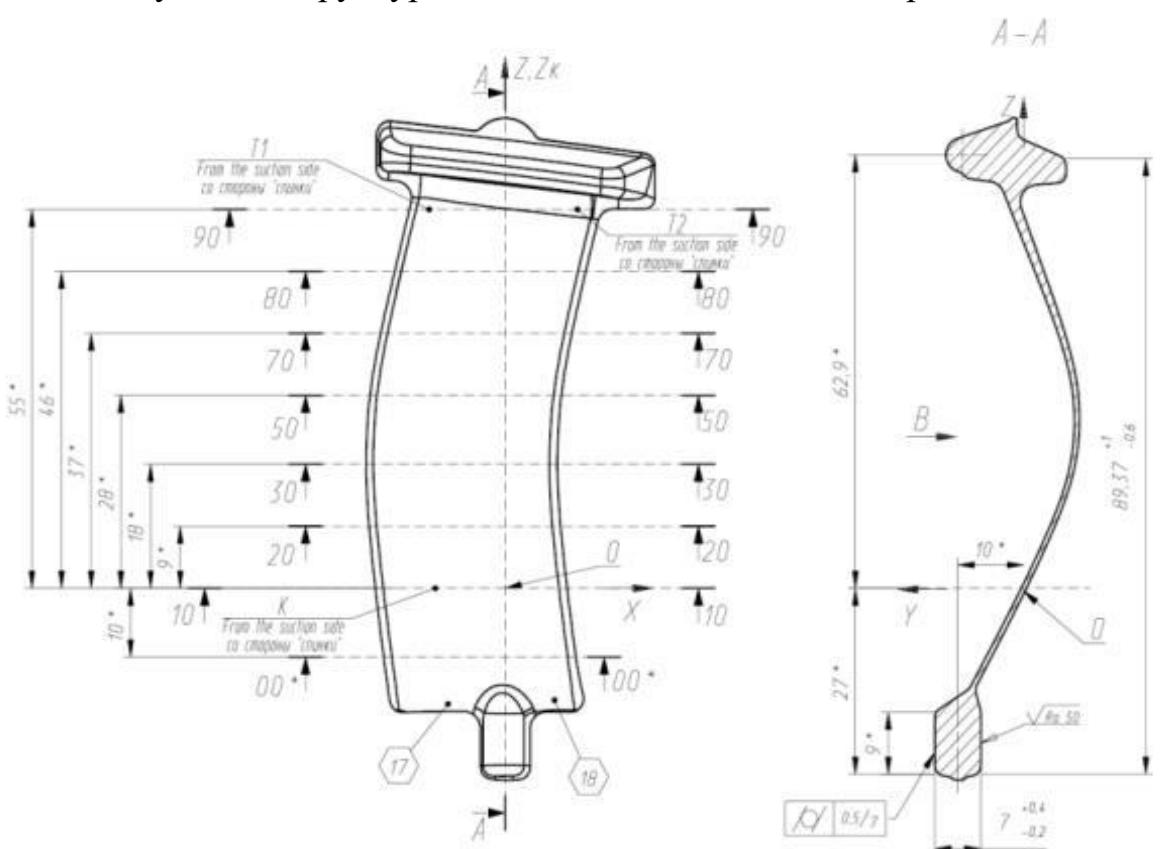


Рисунок 6. 2D-модель лопатки

Основные операции данного технологического процесса связаны с механической обработкой, что приводит к износу оборудования. Это означает, что оно пригодно для изготовления ограниченного числа лопаток, после чего возникает необходимость в изготовлении новой технологической оснастки.

Эффективным способом повышения износостойкости оснастки является ее своевременное (до выхода из строя) обновление. Непрерывный мониторинг уровня качества технологического оборудования позволяет решить данную задачу. Для этого предложена система мониторинга (Рисунок 7), которая позволяет определять вероятностные показатели точности технологических операций, которые далее поступают на вычислитель и блок принятия решений, которые функционируют в соответствии с алгоритмом на Рисунке 4.

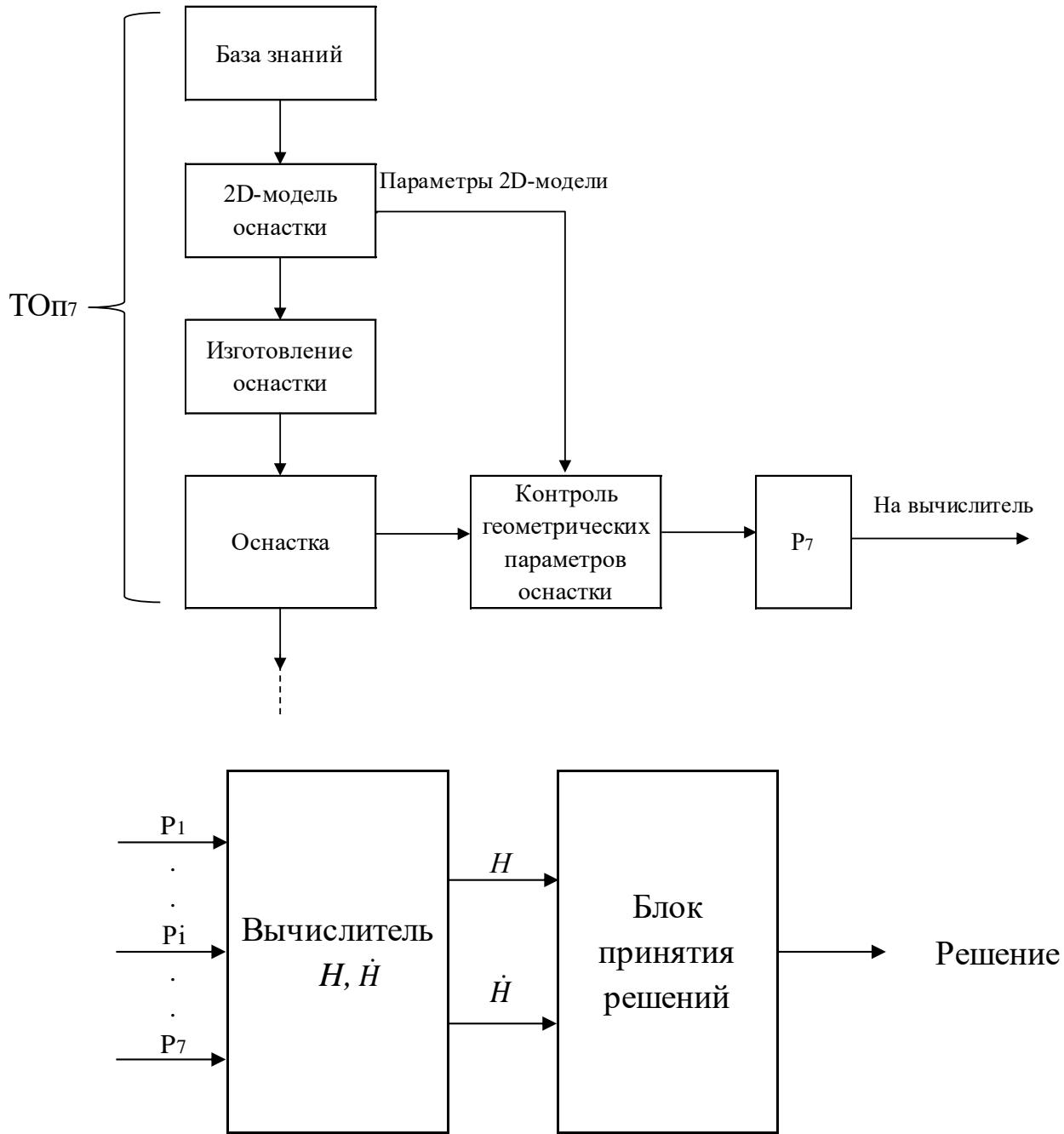


Рисунок 7. Структурная схема системы мониторинга

По положению показателя качества (точки качества) в пределах установленной области качества технологического процесса (Рисунок 8) может приниматься, в случае необходимости, решение об обновлении технологической

оснастки до выхода ее из строя. Такой контроль позволяет снизить себестоимость изготовления оснастки на 15% за счет увеличения ее срока службы.

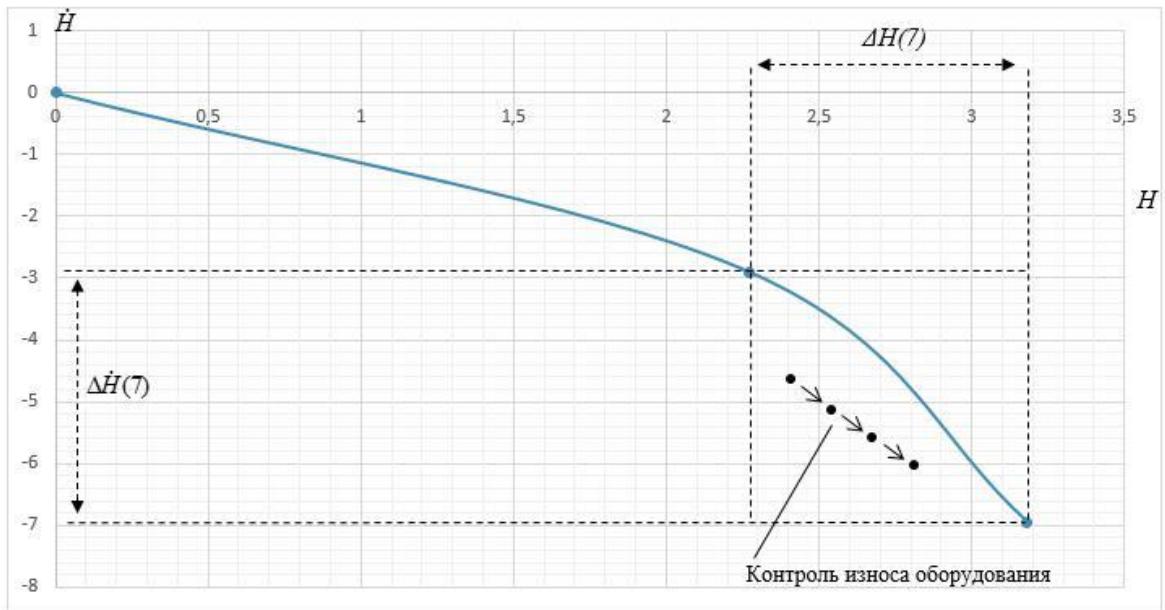


Рисунок 8. Контроль качества технологического процесса изготовления лопаток

*Контроль качества технологического процесса калибровки эталонных мер нанометрии на предприятии АО «НИЦПВ». Технологический процесс калибровки эталонных мер нанометрии представляет собой совокупность взаимосвязанных ТОп (Рисунок 9).*

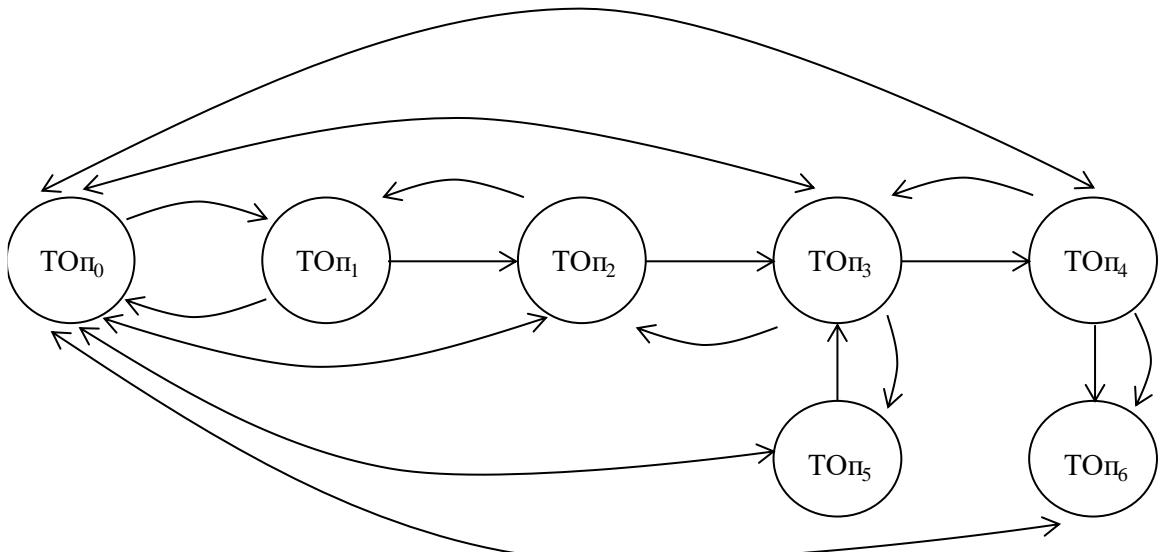


Рисунок 9. Структурная схема ТП калибровки эталонных мер нанометрии

Функции ТОп:

$TOp_0$  — контроль качества функционирования системы управления калибровкой эталонных мер нанометрии.

$TOp_1$  — измерение исходной высоты рельефных элементов поверхности меры.

Т<sub>Оп<sub>2</sub></sub> – измерение высоты эталонных мер путем компарирования с помощью стилусного профилометра Alpha-Step D-600.

Т<sub>Оп<sub>3</sub></sub> – оценка шероховатости.

Т<sub>Оп<sub>4</sub></sub> – магнетронное напыление пленок на поверхность меры по всей площади (Рисунок 10).

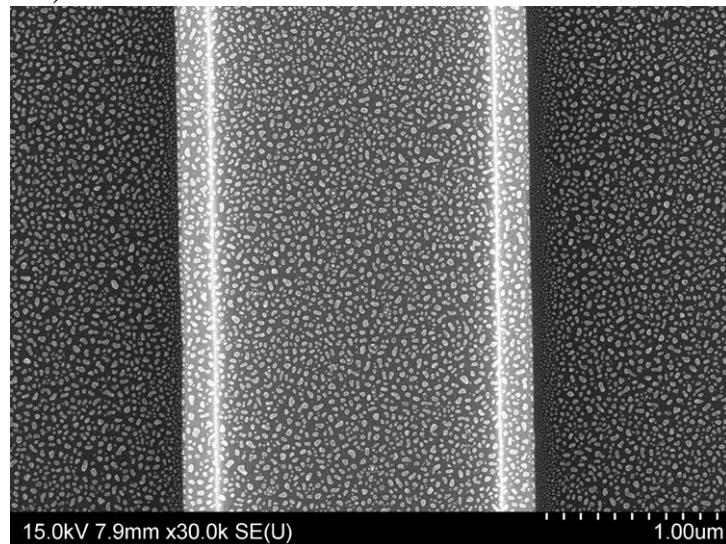


Рисунок 10. Изображение в растровом электронном микроскопе ступени меры после магнетронного напыления

Т<sub>Оп<sub>5</sub></sub> – измерение высоты установленных участков меры после магнетронного напыления.

Т<sub>Оп<sub>6</sub></sub> – измерение высоты эталонной меры методом трехмерной реконструкции в растровом электронном микроскопе.

Согласно разработанной методике, при построении области граничных показателей качества (Рисунок 11), параметры задавались исходя из достижения точности измерения высоты эталонной меры методами интерферометрии ( $\pm 2$  нм).

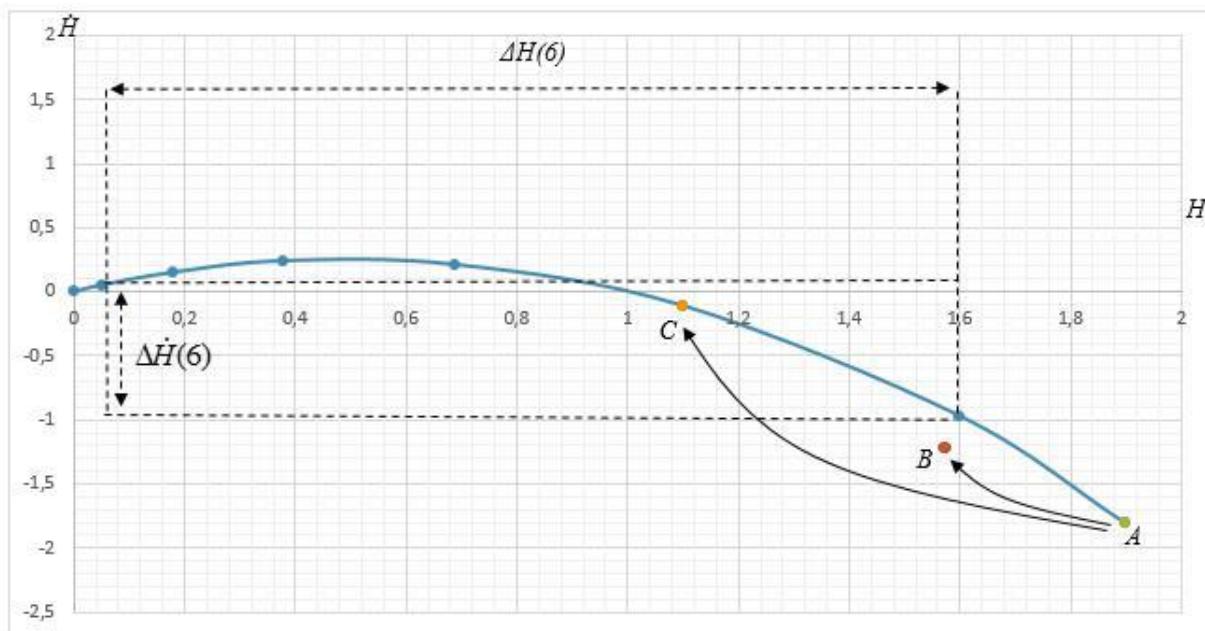


Рисунок 11. Контроль качества процесса калибровки

На рисунке 11:

\* точка *A* – начальный этап процесса калибровки (точность определения высоты меры равна  $\pm 10$  нм);

\* точки *B* и *C* – результат корректировки технологического процесса путем магнетронного напыления на поверхность меры частиц золота (точка *B*) и хрома (точка *C*). Достигнутые при этом точности измерения высоты  $\pm 7$  нм и  $\pm 3,2$  нм, соответственно.

В результате, использование методики контроля качества технологического процесса калибровки обеспечило возможность достижения точности измерения высоты эталонной меры сопоставимой с точностью метода интерферометрии с помощью более простых технических средств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены научно-обоснованные инструменты (методы и алгоритмы), послужившие основой для разработки методики контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства. Разработанная методика обеспечивает возможность оценки как текущего уровня качества технологического процесса, так и возможность его прогнозирования.

### *Основные выводы*

\* Анализ инструментов контроля качества технологических процессов показал, что статистические методы позволяют осуществлять операционный контроль (мониторинг) качества технологического процесса и его изменения под действием различных факторов: износ оборудования технологической оснастки и инструмента, старение, температурные деформации.

\* В организации интеллектуального машиностроительного производства решающую роль приобретают знания. Организационная структура интеллектуального машиностроительного производства строится на основе накопленной базы знаний в обусловленной сфере производства с ее пополнением как из внешних источников, так и за счет приобретения собственного опыта.

\* В качестве математической модели динамики качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства может быть использовано предложенное в работе нелинейное дифференциальное уравнение, позволяющее отслеживать тенденции изменения качества процесса в зависимости от точности выполнения технологических операций, приращения знаний и их использования.

\* Разработанные инструменты обеспечивают возможность создания методик, систем мониторинга и прогнозирования качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

\* Практическое применение разработанных инструментов позволяет существенно снижать себестоимость изготовления оснастки за счет своевременного ее обновления и увеличения, благодаря этому, срока ее службы, а также достижения высоких технических показателей, сопоставимых с эталонными значениями, более простыми техническими средствами.

## *Основные результаты*

\* Разработан алгоритм вероятностной оценки точности технологических операций, сочетающий статистический анализ результатов с прецизионными измерениями, что обеспечивает возможность непрерывного мониторинга качества технологических процессов.

\* Разработана и теоретически обоснована математическая модель динамики качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства, в основу которой положено нелинейное дифференциальное уравнение, связывающее энтропию процесса и ее приращения с приращениями знаний и их использованием.

\* Разработан алгоритм построения граничных значений области качества, в основу которого положена математическая модель динамики качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства.

\* Разработан алгоритм оценки реального показателя качества, основанный на определении текущих значений вероятностных оценок точности технологических операций и соответствующих энтропийных показателей ( $H, \dot{H}$ ).

\* Разработана методика контроля качества технологических процессов, основанная на сопоставлении реального показателя качества с установленными граничными значениями области качества.

\* Предложенные в работе инструменты контроля качества использованы на предприятии АО «ОДК-Пермские моторы» для контроля качества технологического процесса изготовления лопаток газотурбинных двигателей и на предприятии АО «НИЦПВ» для контроля качества технологического процесса калибровки эталонных мер нанометрии.

\* Материалы диссертационной работы использованы в ряде дисциплин по направлению подготовки «Стандартизация и метрология» бакалавриата и магистратуры и по специальностям аспирантуры «Организация производства (по отраслям)» и «Стандартизация и управление качеством продукции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

## **Список основных публикаций**

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н. Контроль качества функционирования интеллектуальных производств // Качество и жизнь. 2022. Т. 34, № 2. С. 11-13. (0,32 п.л. / 0,17 п.л.)

2. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Маслов В.Г. Управление качеством калибровки эталонных мер нанометрии // Качество и жизнь. 2022. Т. 34, № 2. С. 8-10. (0,34 п.л. / 0,13 п.л.)

3. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Методика контроля качества функционирования системы управления калибровкой эталонных мер нанометрии // Наукоемкие технологии. 2022. Т. 23, № 1. С. 29-34. (0,68 п.л. / 0,25 п.л.)

4. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Рusanов К.Е. Методика оценки эффективности структурных элементов когнитивных систем в реальном масштабе времени // Нелинейный мир. 2020. Т. 18, № 3. С. 33-41. (0,83 п.л. / 0,4 п.л.)

5. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Рusanов К.Е. Оценка неравновесной устойчивости когнитивных систем // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, № 11. С. 14-19. (0,8 п.л. / 0,38 п.л.)

6. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Рusanов К.Е. Стандартизация показателей неравновесной устойчивости когнитивных систем // Наукоемкие технологии. 2017. Т.18, № 5. С. 15-20. (0,88 п.л. / 0,4 п.л.)

Публикации, входящие в перечень SCOPUS:

1. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Algorithms for monitoring the functioning of nonequilibrium information processing systems // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2094. Issue 2. P. 022024. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022024 (0,42 п.л. / 0,2 п.л.)

2. Antsyferov S.S., Karabanov D.A., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Reference gage calibration methods of probe nanometry systems // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1889. Issue 4. P. 042034. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042034 (0,47 п.л. / 0,14 п.л.)

3. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Modeling of control processes of nonequilibrium systems functioning // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2402. P. 050006. DOI: 10.1063/5.0071694 (0,32 п.л. / 0,12 п.л.)

4. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Method for controlling the cognitive systems functioning in non-equilibrium stability mode // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. Issue 3. P. 032068. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032068 (0,33 п.л. / 0,13 п.л.)

Другие издания:

1. Фазилова К.Н. Вопросы практической реализации методики оценки неравновесной устойчивости когнитивных систем // Инновационные технологии в электронике и приборостроении. Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА. Москва. 2020. С. 346-353. (0,65 п.л.)