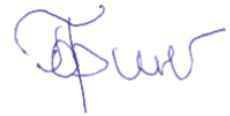


На правах рукописи



Финагеев Павел Рамдисович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК  
ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** **Унянин Александр Николаевич,**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Инновационные технологии в  
машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновский  
государственный технический университет»,  
г. Ульяновск

**Официальные оппоненты:** **Чигиринский Юлий Львович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технология машиностроения»  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет»

**Зверовщиков Александр Евгеньевич,**  
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой  
«Технологии и оборудование машиностроения»  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
университет»

**Ведущая организация:**  
**ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»**

Защита состоится «26» декабря 2023 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета - [www.ulstu.ru](http://www.ulstu.ru)

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Н.И. Веткасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Задача определения рационального режима процесса механической обработки, влияющего на производительность обработки, качество и стоимость изготовленных деталей, является актуальной.

Рациональным методом назначения режима является его расчёт с использованием моделей, связывающих выходные и входные параметры процесса. Однако многие модели не учитывают влияния ряда управляемых и неуправляемых факторов. Во многих случаях отсутствуют данные, касающиеся выбора параметров моделей, например, коэффициентов трения в зонах контакта инструмента со стружкой и заготовкой, зависимостей параметров механических и теплофизических характеристик инструментального и обрабатываемого материала от температуры и др. Модели, полученные эмпирическим путём, показывают достоверные результаты лишь в тех условиях, в которых были проведены экспериментальные исследования.

Не все модели, разработанные для процессов механической обработки, представляют процесс резания как динамическую систему с изменяющимися во времени параметрами. Известные методики назначения режима резания не учитывают эти изменения. Однако, износ режущего инструмента, силы резания, температуры и выходные параметры процесса изменяются с увеличением времени работы инструмента. Колебания припуска и механических свойств материала заготовки, изменение жёсткости технологической системы и другие неуправляемые факторы также влияют на выходные параметры процесса.

Вышеприведённые причины ведут к неопределённости информации, связанной с влиянием неуправляемых факторов, отсутствием корректных математических моделей и исходных данных для расчёта выходных параметров в зависимости от условий обработки и элементов режима резания. Неопределённость информации является причиной того, что разность между расчетными и фактическими значениями выходных параметров составляет во многих случаях 20...30 % и более.

Следовательно, режим обработки, полученный расчётным путём, может быть далек от оптимального. В справочниках и каталогах рекомендуемые элементы режима приведены широким диапазоном значений. Поэтому во многих случаях назначенный режим корректируют на этапе отладки технологического процесса и возникает необходимость в разработке методики коррекции режима резания, учитывающей, что изменение каждого из управляемых факторов отражается на изменении практически всех выходных параметров процесса. Следовательно, разработка подобной методики назначения режима резания является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросу назначения рационального режима резания и управления процессом обработки посвящены работы Анцева А.В., Ардашева Д.В., Балакшина Б.С., Безъязычного В.Ф., Бобыря М.В., Завгороднего В.И., Ивченко Т.Г., Иноземцева А.Н., Зориктуева В.Ц., Кабалдина Ю.Г., Карплюк А.Ф., Медведева В.В., Петрешина Д.И., Полтавца В.В., Плотникова А.Л., Руденко А.С., Сулова А.Г., Чигиринского Ю.Л., Юркевича В.В., Abburi N.R., Alaskari A., Ali S.M., Dhar N.R.,

Bernardos P.G., Dixit U.S., Karpat Y., Koren Y., Oraby S.E., Ozel T., Prasad B.S., Ulsoy A.G. и др.

Отсутствуют методики коррекции режима процесса резания с изменяющимися параметрами и учитывающие, что изменение каждого из управляемых факторов отражается на изменении практически всех выходных параметров процесса.

**Целью исследования** является разработка методик коррекции режима механической обработки в условиях неопределённости технологической информации, позволяющих повысить производительность операций механической обработки при обеспечении требуемого качества деталей.

В ходе выполнения данной работы предполагается решить следующие **задачи**:

1. Разработать методики коррекции режима течения при различных соотношениях предельных и фактических значений выходных параметров и план варьирования управляемыми факторами с целью приближения их к оптимальным значениям.

2. Разработать математические модели для расчёта выходных и текущих параметров процесса течения и полей их рассеивания.

3. Разработать методику определения изменяющихся во времени выходных параметров и текущих показателей процесса течения.

4. Разработать модели, алгоритмы и программное обеспечение для коррекции назначенного режима течения.

5. Оценить эффективность разработанных методик коррекции режима на основе анализа результатов их функционирования.

#### **Научная новизна работы.**

1. Методики коррекции режима резания при различных соотношениях заданных и фактических значений выходных параметров, включающие план варьирования управляемыми параметрами с целью адаптации (коррекции) моделей процесса и приближения управляемых параметров к оптимальному значению.

2. Математические модели и зависимости для расчёта температурного поля, шероховатости обработанной поверхности и полей их рассеивания и расчета погрешности диаметрального размера детали. Модели учитывают изменение механических и теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента в зависимости от температуры в зоне обработки.

3. Методика определения взаимосвязанных текущих и выходных параметров процесса обработки, позволяющая рассчитать их значения в зависимости от времени наработки инструмента.

4. Результаты численного моделирования параметров процесса течения, в том числе исследование влияния износа резца на температурное поле и изменения предела текучести материала заготовки на рассеивание контактных температур и тангенциальной составляющей силы резания.

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

1. Методики коррекции режима при различных соотношениях заданных и фактических значений выходных параметров, в том числе с учётом изменения текущих и выходных параметров процесса во времени.
2. Методика определения изменяющихся во времени параметров процесса на основе разработки алгоритма его функционирования.
3. Модели и зависимости для расчёта параметров процесса точения и полей их рассеивания: температурного поля, шероховатости обработанной поверхности и погрешности диаметрального размера детали.
4. Результаты численного моделирования тангенциальной составляющей силы резания и температур на передней и задней поверхностях инструмента.
5. Результаты экспериментальных исследований эффективности разработанных методик коррекции режима точения.

### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для коррекции режима точения (свидетельства на регистрацию программных продуктов: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669693 Российская Федерация. Коррекция режима точения; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669706 Российская Федерация. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации).
2. Разработано программное обеспечение для расчёта контактных температур при точении (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610980 Российская Федерация. Расчет температуры резания при точении с наложением вибраций).
3. Результаты экспериментальных исследований и опытно-промышленного испытания эффективности разработанных методик коррекции режима показали, что их применение позволяет повысить производительность процесса точения на 25 ... 35 % при обеспечении заданного качества деталей.

**Методы исследования.** Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории резания, теории упругости, теории автоматического управления, математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены на современном технологическом и вычислительном оборудовании. При обработке экспериментальных данных применялись методы статистической обработки результатов.

**Достоверность результатов исследований** диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования, аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных, применением статистических методов обработки результатов и сопоставлением полученных результатов с работами других авторов.

**Личный вклад автора** Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке теоретико-

экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов принадлежит автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем. Личный вклад автора составляет 75%.

**Реализация результатов работы.** Проведены опытно-промышленные испытания методики коррекции режима течения и получен акт испытаний в АО «ФРЕСТ» при обработке стальных заготовок твердосплавным режущим инструментом. Результаты испытаний показали, что применение методики коррекции и программного обеспечения позволяет повысить производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества обработанных заготовок.

**Апробация работы.** Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались в рамках научно-технических конференций (НТК) и семинарах ФГБОУ ВО УлГТУ в 2017 – 2022 г. г. и на всероссийских и международных НТК в г. Кемерово, г. Ростов-на-Дону, г. Самара, г. Севастополе, г. Ульяновске.

**Публикации.** Результаты исследований представлены в 24 публикациях, в том числе 5 – в изданиях из перечня ВАК; 4 – в изданиях из базы Scopus; получено 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы 215 страниц, 49 рисунков, 32 таблицы и 138 наименований литературы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении обоснована** актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** приведены и обоснованы причины отклонения режима резания от оптимального значения, появления ситуации неопределённости технологической информации.

Проанализированы существующие методы назначения режима резания и управления процессом механической обработки в условиях неопределенности информации.

Проблеме назначения рационального режима течения посвящены работы Анцева А.В., Балакшина Б.С., Безъязычного В.Ф., Бобыря М.В., Завгороднего В.И., Ивченко Т.Г., Иноземцева А.Н., Зориктуева В.Ц., Кабалдина Ю.Г., Карплюк А.Ф., Медведева В.В., Петрешина Д.И., Плотникова А.Л., Руденко А.С., Суслова А.Г., Юркевича В.В., Abburi N.R., Alaskari A., Ali S.M., Dhar N.R., Bernardos P.G., Dixit U.S., Karpat Y., Koren Y., Oraby S.E., Ozel T., Prasad B.S., Ulsoy A.G. и других отечественных и зарубежных исследователей.

Рациональным методом назначения режима резания является его расчёт с использованием зависимостей и формул теории резания. Наиболее достоверными являются модели, которые учитывают изменение процесса механической обработки во времени. Анализ научно-технической литературы

показал, что процесс резания следует рассматривать как динамическую систему, т. к. на выходные параметры процесса обработки значительное влияние оказывают факторы, изменяющиеся с увеличением наработки инструмента (износ инструмента, сила резания, температура, вибрации и др.). Перспективными являются системы, которые позволяют управлять величиной выходных параметров (таких как шероховатость поверхности и размер детали) с учетом изменяющихся во времени параметров процесса обработки.

На основании анализа научно-технической и патентной литературы сформулированы цель и задачи исследования, выполненного автором.

**Во второй главе** представлена методика определения взаимосвязанных текущих показателей и выходных параметров процесса обработки, разработаны методики коррекции режима резания для различных ситуаций.

Использовано понятие резерва (запаса) выходного параметра как разницы между заданным (регламентированным) значением параметра  $Y_i^{max}$  и его расчётным  $Y^P$  или фактическим значением  $Y^Ф$ , причем разница между  $Y_i^{max}$  и  $Y^P$  является расчётным, а между  $Y_i^{max}$  и  $Y^Ф$  – фактическим резервом (запасом). При определении управляемых параметров полагали, что их значения будут близки к оптимальным, когда резерв одного выходного параметра равен нулю при положительных резервах остальных параметров.

При этом могут возникнуть следующие ситуации:

1. Все фактические резервы являются положительными.
2. Часть фактических резервов или все они являются отрицательными.
3. Один или несколько фактических резервов равны нулю, остальные являются положительными.

Для этих ситуаций разработан план варьирования управляемыми параметрами с целью адаптации моделей процесса и приближения параметров процесса к оптимальному уровню. Методики учитывают наличие множества управляемых и выходных параметров процесса, однако на практике не всегда используется полный набор этих параметров.

Предложены две методики коррекции режима.

1. *При малой наработке инструмента, когда влиянием износа на параметры процесса можно пренебречь.*

Ниже приведен пример реализации методики при варьировании одним управляемым параметром (подачей  $S_{об}$ ) и измерении двух выходных параметров (параметр шероховатости  $Ra$  и погрешность диаметрального размера  $\omega$ ).

Предварительно рассчитывается режим резания или назначается по каталогу режущего инструмента. На данном режиме производится обработка партии заготовок и фиксируются значения выходных параметров. Когда все измеряемые параметры имеют положительный резерв, режим обработки можно интенсифицировать с целью повышения производительности процесса.

Выявляют выходной параметр, имеющий меньшее значение относительного положительного резерва (запаса), и определяют управляющее воздействие, который сведет к нулю резерв этого параметра. Если меньший резерв имеет параметр шероховатости  $Ra$ , то значение управляемого параметра (подачи  $S_{об}$ ) следует изменить на величину  $\Delta S_{об}$ :

$$\Delta S_{об} = \frac{Ra^{max} - Ra^{0ф}}{k' \cdot \frac{dRa}{dS_{об}}(p) \cdot k_3}, \quad (1)$$

где  $Ra^{max}$  – заданное (регламентированное) значение параметра  $Ra$ ;  $Ra^{0ф}$  – фактическое значение выходного параметра  $Ra$ , полученное на назначенном режиме обработки;  $k'$  – число входных управляемых параметров (в данном случае  $k' = 1$ );  $k_3$  – коэффициент запаса ( $k_3 = 1,1 \dots 2,0$ );  $\frac{dRa}{dS_{об}}(p)$  – частная производная,

показывающая степень влияния подачи  $S_{об}$  на выходной параметр  $Ra$ . Производные получают дифференцированием математических зависимостей, связывающих выходные и входные параметры процесса обработки. Затем полученные значения  $\Delta S_{об}$  следует подставить в математическую зависимость для определения интервала изменения второго параметра  $\omega$ :

$$\Delta \omega = \frac{d\omega}{dS_{об}}(p) \cdot \Delta S_{об}, \quad (2)$$

где  $\frac{d\omega}{dS_{об}}(p)$  – частная производная, показывающая степень влияния подачи  $S_{об}$  на выходной параметр  $\omega$ .

Если резерв параметра  $\omega$  является положительным, то управляемый параметр  $S_{об}$  изменяют на величину  $\Delta S_{об}$  и получают новое значение подачи  $S_{об}^1$ :

$$S_{об}^1 = S_{об} + \Delta S_{об}. \quad (3)$$

Производят обработку заготовок на скорректированном режиме с измерением фактических значений выходных параметров и принимают решение относительно продолжения процедуры коррекции режима. Измеренные (фактические) значения выходных параметров используют для коррекции моделей процесса и на последующих этапах коррекции режима значения управляемых параметров рассчитывают, ориентируясь на адаптированные модели процесса.

*2. Методика коррекции, учитывающая изменение параметров процесса резания с течением времени обработки.*

Ниже приведен пример реализации данной методики при варьировании одним управляемым параметром (скоростью резания  $V$ ) и измерении двух выходных ( $Ra$  и  $\omega$ ). Предварительно рассчитывается режим резания или назначается по каталогу режущего инструмента. Режим корректируется таким образом, чтобы в момент времени, равный заданному периоду стойкости инструмента, расчётный резерв одного из выходных параметров был равен нулю, при положительных расчётных резервах остальных параметров.

Если при назначенном режиме в момент времени  $\tau_c$  ( $\tau_c$  – период стойкости режущего инструмента) значение хотя бы одного выходного параметра превышает предельное значение этого параметра (в данном примере  $Ra^{max}$  и (или)  $\omega^{max}$ ), то следует изменить режимы, чтобы не допустить появления бракованных изделий. Рис. 1, а иллюстрирует ситуацию, когда выходной параметр  $Ra$  имеет в конце периода стойкости отрицательный резерв, рис. 1, б –



когда этот резерв является положительным. Для второго выходного параметра ( $\omega$ ) графики выглядят аналогично.

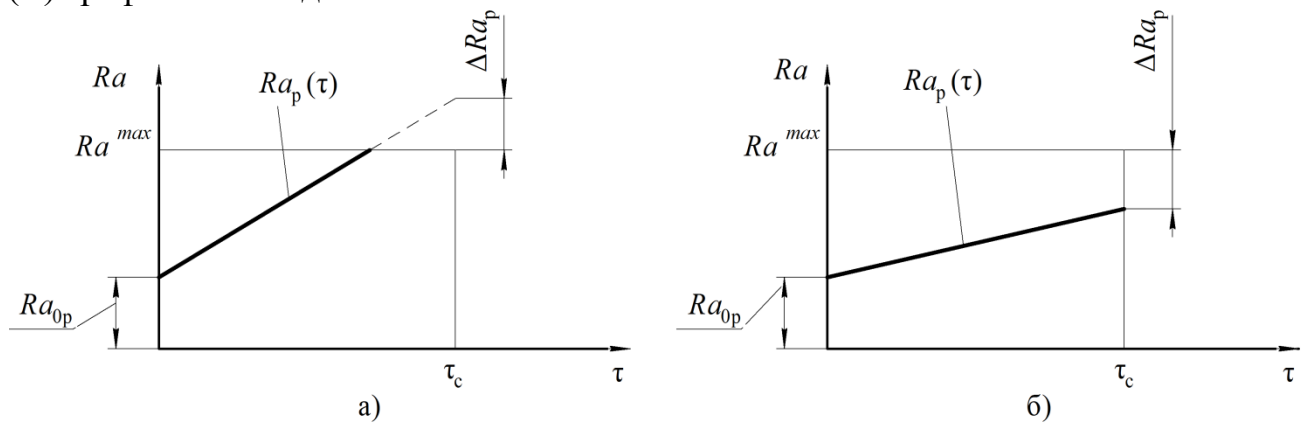


Рис. 1. График зависимости расчётного значения параметра шероховатости  $Ra$  от времени  $\tau$ :  
 а) расчётное значение параметра шероховатости  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$  превышает заданное;  
 б) расчётное значение параметра шероховатости  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$  не превышает заданное

Интервал варьирования управляемым параметром (в данном случае скоростью резания  $V$ ) должен обеспечить изменение расчётных значений выходных параметров ( $Ra$ ,  $\omega$ ) в момент времени, равный периоду стойкости инструмента  $\tau_c$ , на величину  $\Delta Ra_p$  (см. рис. 1):

$$\Delta Ra_p = Ra_p^{\tau_c} - Ra^{max} \quad (\text{см. рис. 1, а}); \quad (4)$$

или

$$\Delta Ra_p = Ra^{max} - Ra_p^{\tau_c} \quad (\text{см. рис. 1, б}), \quad (5)$$

где  $Ra_p^{\tau_c}$  – расчётное значение выходного параметра  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$ .

Для второго выходного параметра ( $\omega$ ) зависимости (4), (5) выглядят аналогично.

Ниже рассмотрена ситуация, когда оба выходных параметра ( $Ra$  и  $\omega$ ) имеют положительный расчётный резерв и режим можно интенсифицировать с целью увеличения производительности обработки. Если меньший относительный положительный резерв имеет параметр  $Ra$ , то интервал варьирования управляемым параметром:

$$\Delta V = \frac{\Delta Ra_p}{k' \cdot \frac{dRa}{dV}(p) \cdot k_3}, \quad (6)$$

где  $\Delta Ra_p$  – величина, на которую следует изменить значение выходного параметра  $Ra$  в момент времени  $\tau_c$ .

Производную  $\frac{dRa}{dV}(p)$  определяют, ориентируясь на аналитические зависимости для расчёта выходных параметров в начальный момент времени  $\tau_0$ .

По зависимости (2) рассчитывается интервал изменения второго параметра  $\omega$  и оценивается его резерв. При положительном резерве управляемый параметр  $V$  изменяют на величину  $\Delta V$  и получают значение этого параметра  $V^{lp}$ , при котором моделируют процесс:

$$V^{1p} = V^{0p} + \Delta V, \quad (7)$$

где  $V^{0p}$  – начальное значение скорости резания  $V$ , полученное после расчёта или назначения режима обработки, м/мин.

Если при значении управляемого параметра  $V^{1p}$  расчётные значения выходных параметров  $Ra_p^{\tau_c}$  и  $\omega_p^{\tau_c}$  в момент времени  $\tau_c$  значительно отличаются от заданных  $Ra^{max}$  и  $\omega^{max}$ , следует повторить процедуру коррекции значений управляемых параметров. На рис. 2. представлена ситуация, когда расчётный резерв по параметру  $Ra$  нулю.

На скорректированном режиме резания производится обработка заготовок и фиксируются фактические значения выходных параметров. Ситуацию, когда выходной параметр  $Ra$  имеет положительный фактический резерв, иллюстрирует рис. 3.

Зависимость фактических значений выходных параметров от времени можно выразить в виде полиномов типа:

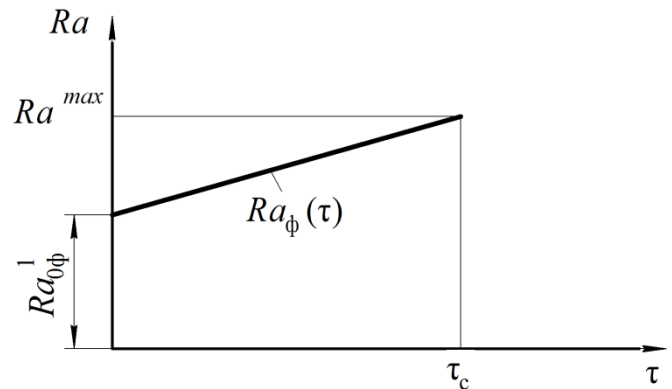


Рис. 2. График зависимости фактического значения выходного параметра  $Ra_{\phi}$  от времени  $\tau$

$$Ra_{\phi}(\tau) = Ra_{0\phi} + Ra_{1\phi} \cdot \tau; \quad \omega_{\phi}(\tau) = \omega_{0\phi} + \omega_{1\phi} \cdot \tau, \quad (8)$$

где  $Ra_{0\phi}$ ,  $\omega_{0\phi}$ ,  $Ra_{1\phi}$ ,  $\omega_{1\phi}$  – коэффициенты;  $\tau$  – время обработки.

Коэффициенты  $Ra_{0\phi}$  и  $\omega_{0\phi}$  соответствует фактическим значениям выходных параметров  $Ra$  и  $\omega$  в начальный момент времени  $\tau_0$ ; коэффициенты  $Ra_{1\phi}$  и  $\omega_{1\phi}$  характеризуют интенсивности изменения фактических значений этих параметров во времени. Вследствие возможной некорректности математических моделей параметров процесса обработки в большинстве случаев кривая изменений фактических значений выходных параметров будет отличаться от расчётной.

В данном примере выходным параметром, имеющим минимальный фактический резерв, является параметр шероховатости  $Ra$ . Интенсивность изменения этого параметра:

$$Ra_{1\phi} = \frac{Ra_{\phi}^{\tau_c} - Ra_{0\phi}}{\tau_c}, \quad (9)$$

где  $Ra_{\phi}^{\tau_c}$  – фактическое значение параметра  $Ra$  в момент  $\tau_c$ .

В момент времени  $\tau_0$  параметр  $Ra$  (коэффициент  $Ra_{0\phi}^1$ ) должен иметь значение (рис. 3):

$$Ra_{0\phi}^1 = Ra^{max} - Ra_{1\phi} \cdot \tau_c. \quad (10)$$

Интервал варьирования управляемым параметром  $V$ , позволяющий в начальный момент времени  $\tau_0$  обеспечить значение  $i$ -го выходного параметра равным  $Ra_{0\phi}^1$ :

$$\Delta V = \frac{Ra_{0\phi}^1 - Ra_{0\phi}}{k' \cdot \frac{dRa}{dV}(p) \cdot k_3}, \quad (11)$$

где  $k'$  – коэффициент, равный количеству управляемых параметров;  $\frac{dRa}{dV}(p)$  – частная производная, полученная на основе скорректированной зависимости параметра  $Ra$  от входных параметров в момент времени  $\tau_0$ ;  $k_3$  – коэффициент запаса ( $k_3 = 1,1 \dots 2,0$ ). Затем по формуле, аналогичной (2), рассчитывается изменение параметра  $\omega$  и оценивается резерв данного параметра.

При положительном резерве рассчитывается скорректированное значение скорости резания  $V$ :

$$V^1 = V + \Delta V. \quad (12)$$

В некоторых случаях целесообразно выполнить процедуру коррекции после наработки инструмента в течение времени, меньшего его периода стойкости, а затем экстраполировать кривые, характеризующих изменение за это время фактических значений выходных параметров, на время, равное периоду стойкости.

С увеличением времени наработки инструмента параметры, характеризующие его состояние (в частности, износ) изменяются, вследствие чего изменяются показатели процесса обработки (силы и температуры). С другой стороны, параметры состояния инструмента зависят от показателей процесса обработки (сил и температур). Определение этих взаимосвязанных параметров выполнено на основе разработанного алгоритма функционирования процесса, когда время разбито на интервалы  $\Delta\tau$ , а расчёты выходных и текущих параметров процесса выполняются для периодов времени  $\tau_0, \tau_1 \dots \tau_i \dots \tau_{max}$ , где  $\tau_{max}$  – время функционирования процесса. Силы и температуры, рассчитанные для момента времени  $\tau_i$ , используются для расчёта интенсивности изнашивания инструмента в последующий момент  $\tau_{i+1}$  и наоборот. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта функций, характеризующих изменение во времени математического ожидания (центра группирования) и границ мгновенных полей рассеивания расчетных параметров процесса точения.

Для возможности практического использования методик коррекции режима необходимо разработать математические модели для расчёта текущих показателей процесса (силы резания и температур) и выходных параметров (параметров качества детали) процесса токарной обработки и полей их рассеивания.

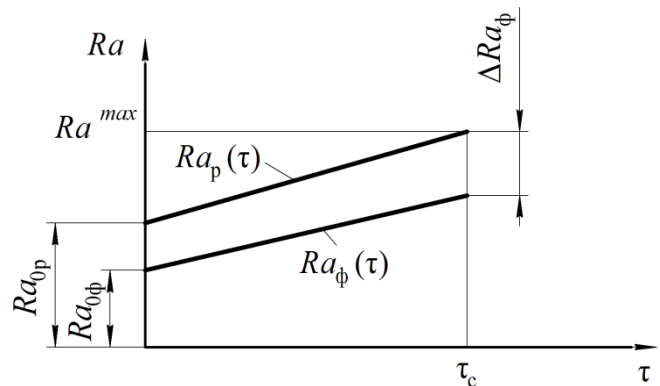


Рис. 3. График зависимости фактического значения выходного параметра  $Ra_{\phi}$  от времени при коррекции режима в начальный момент времени  $\tau$

В третьей главе обоснован выбор контролируемых выходных параметров, разработаны соответствующие математические модели для их расчёта, выполнено численное моделирование выходных параметров процесса точения, приведена методика статистического анализа их фактических значений. Для апробации методики коррекции режима в качестве контролируемых выходных параметров выбраны параметр шероховатости  $Ra$  и погрешность диаметрального размера  $\omega$ .

Получена зависимость для расчёта погрешности диаметрального размера, учитывающая систематические и случайные факторы, действующие в процессе обработки. Поле рассеивания, обусловленное упругими деформациями элементов технологической системы, определили, используя зависимость для приращения функции нескольких переменных, полагая, что переменными параметрами являются предел текучести материала заготовки и глубина резания.

Получена зависимость для расчёта высотного параметра шероховатости  $Ra$ , отличающаяся от известных использованием аналитического метода расчёта силы резания и учитывающая, что параметр  $Ra$  будет изменяться с увеличением времени обработки за счет изменения длины контакта задней поверхности резца с обрабатываемой поверхностью, фактической площади контакта инструмента с заготовкой и предела текучести материала заготовки, которые зависят от температуры резания.

Зависимость для расчёта мгновенного поля рассеивания параметра шероховатости при условии, что параметром, оказывающим преобладающее влияние на его рассеивание, является колебание (рассеивание) напряжения текучести материала обрабатываемой заготовки  $\Delta\sigma_s$ :

$$\Delta Ra = \frac{df}{d\sigma_s} \cdot \Delta\sigma_s, \quad (13)$$

где  $f$  – функция, описывающая зависимость параметра  $Ra$  от аргументов.

В результате получено выражение:

$$\Delta Ra = \left( \begin{array}{l} \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot \left\{ \left[ 1 + \mu \cdot (1 - tg\gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_C} \right] \cdot \sin \gamma + \frac{l_2}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta t_r + \\ + \frac{1,155 \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}}\right) \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \frac{1}{u \cdot a} \right\}}{j_y} \cdot \Delta l_2 \\ + \frac{\left( 0,5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2\sigma_s}} \right) \right) \cdot \left( 2 \cdot S + 0,5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - \frac{\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2\sigma_s}} \right) \right)}{32 \cdot r} \end{array} \right) \cdot \Delta\sigma_s, \quad (14)$$

где  $T_g$  – температура в области пластической деформации,  $K$ ;  $T_{пл}$  – плавления материала заготовки,  $K$ ;  $S_{об}$  – подача, мм/об;  $\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести;  $\gamma$  – передний угол резца, град;  $u$  – коэффициент ( $u = 1$  при

$\gamma \geq 0^\circ$ ,  $u = 1 - \sin \gamma$  при  $\gamma < 0^\circ$ );  $k_c$  – коэффициент утолщения стружки;  $l_2$  – длина контакта задней поверхности резца с обработанной поверхностью заготовки, мм;  $a$  – толщина срезаемого слоя заготовки, мм;  $t_r$  – глубина резания, мм;  $\sigma_s$  – предел текучести материала заготовки, МПа;  $\sigma_b$  – предел прочности материала заготовки, МПа;  $\rho$  – радиус вспомогательной режущей кромки, мм;  $j_y$  – жёсткость технологической системы, Н/мм;  $r$  – радиус при вершине резца, мм;  $\Delta l_2$  – колебания параметра  $l_2$ , мм;  $\Delta t_r$  – колебания глубины резания, мм;  $\Delta \sigma_s$  – колебания предела текучести материала заготовки, МПа.

Для расчёта параметров процесса резания в любой момент времени необходимо знать значения температур резания.

Полагали, что теплота при точении выделяется в области стружкообразования (пластической деформации) и на поверхностях контакта резца со стружкой и заготовкой. Температура в области пластической деформации рассчитывается в процессе численного моделирования температурного поля и используется для расчёта напряжения текучести  $\sigma_{st}$ . Это позволяет учесть зависимость напряжения текучести материала заготовки от температуры. Дифференциальные уравнения теплопроводности контактирующих в процессе теплообмена объектов решали совместно с общими граничными условиями, используя численный метод конечных элементов (МКЭ). При построении дискретных аналогов дифференциальных уравнений теплопроводности использовали универсальный метод баланса. Методика расчёта на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в программе. В целях верификации моделей результаты расчета температур сравнивали с экспериментальными результатами, полученными А.Н. Резниковым. Расхождение экспериментальных значений и расчётных, полученных для условий, в которых проведен эксперимент, не превышает 10%.

При разбросе значений напряжения текучести материала заготовки в пределах 20% диапазон рассеивания силы резания и контактных температур составляет 18 ... 20%. Это дает возможность определить поле рассеивания контактных температур при точении в зависимости от величины предела текучести материала заготовки  $\sigma_s$ .

Для коррекции режима с учётом изменения во времени фактических значений параметров процесса применяли методику статистической обработки фактических значений выходных параметров и текущих показателей процесса обработки. Методика основана на разделении величины (поля) рассеивания параметров на систематическую и случайную составляющие. Для выделения этих составляющих параметров использован дисперсионный метод. Методика позволяет выявить функции, характеризующие изменение во времени средних арифметических и границ мгновенных полей рассеивания фактических (измеренных) значений параметров, а также период стойкости инструмента и (или) время подналадки станка. Для подбора функций предлагается использовать метод средних квадратов.

**В четвертой главе** приведены сведения о разработке программного обеспечения для назначения режима точения и результаты его апробации.

Для коррекции режима разработаны и зарегистрированы программы: «Коррекция режима точения» (при незначительной наработке инструмента, когда его износом можно пренебречь) и «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации», позволяющую учесть изменение параметров процесса точения.

Исследование эффективности функционирования методики коррекции при малой наработке инструмента выполнили для следующих условий: материал заготовок – сталь 45; режущая пластина (СМП) – SNMG120408 T15K6; заданное (регламентированное) значение шероховатости  $Ra = 3,2$  мкм; точность диаметрального размера по 10 качеству –  $\phi 78h10 (-0,120)$  мм.

В результате расчёта получены значения элементов режима:  $V = 121$  м/мин;  $S_{об} = 0,08$  мм/об; глубина резания  $t_r = 1$  мм. Обработав партию заготовок, получили результаты, приведённые в первой строке табл. 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

№ эксперимента	Подача $S_{об}$ , мм/об	Погрешность диаметрального размера $\omega$ , мм	Фактическое значение шероховатости $Ra$ , мкм
1	0,080	0,04	1,42
2	0,264	0,04	3,69
3	0,234	0,03	3,02

По обоим выходным параметрам получены положительные фактические резервы (запасы). Принято решение варьировать подачей  $S_{об}$ . В результате работы программы «Коррекция режима точения» получено ее скорректированное значение  $S_{об} = 0,264$  мм/об. Однако, поскольку значение подачи было рассчитано с использованием аналитической зависимости, вследствие расхождения расчётных и экспериментальных значений получен отрицательный фактический резерв (запас) по параметру шероховатости  $Ra$ ; резерв по погрешности диаметрального размера – положительный. Следовательно, необходимо выполнить этап повторной коррекции режима. По итогам расчёта получили значение подачи  $S_{об} = 0,234$  мм/об. При повторной коррекции режим рассчитывали, используя адаптированные модели для расчёта выходных параметров, в результате получены положительные фактические резервы.

По сравнению с рассчитанным режимом обработки, подача увеличилась в 2,92 раза, что позволяет сократить машинное время обработки в 2,92 раза по сравнению с обработкой на режиме, рассчитанном по формулам теории резания, при обеспечении заданного (требуемого) качества обработанных деталей.

Исследование эффективности методики коррекции режима резания, учитывающей изменение параметров процесса с течением времени, проводили при следующих условиях: материал заготовок – коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T; режущая пластина – 120408 T15K6. Регламентированное значение шероховатости  $Ra = 3,2$  мкм; точность диаметрального размера по 10 качеству –  $\phi 48h10 (-0,100)$  мм.

По формулам теории резания получены следующие значения элементов режима обработки:  $t_r = 1$  мм;  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $V = 146$  м/мин. Значение периода стойкости инструмента приняли равным  $\tau_c = 30$  мин.

Кривые изменения расчётных значений выходных параметров с увеличением времени наработки, полученные при помощи программы «Коррекция режима течения в условиях неопределённости технологической информации», свидетельствуют, что расчётное значение диаметра цилиндрической шейки в момент времени 30 мин превышает заданное значение, поэтому необходимо выполнить коррекцию режима, чтобы не допустить изготовления бракованных деталей. Из результатов расчёта следует, что подача  $S_{об}$  оказывает незначительное влияние на величину погрешности диаметрального размера, поэтому принято решение варьировать скоростью резания  $V$ .

В процессе коррекции необходимо добиться того, чтобы в момент времени, равный периоду стойкости резца (30 мин), расчётный резерв одного выходного параметра был равен нулю при положительном резерве второго параметра.

Расчёты показали, что, если скорость резания принять равной  $V_1 = 142$  м/мин, то нулю должен быть равен резерв погрешности диаметрального размера (рис. 4). Производится обработка заготовок на скорректированном режиме при наработке инструмента в течение 5,23 мин (меньшим, чем период стойкости), а затем экстраполируются (используя методику статистической обработки фактических значений параметров) кривые изменения фактических значений выходных параметров на время, равное периоду стойкости резца (см. рис. 4).

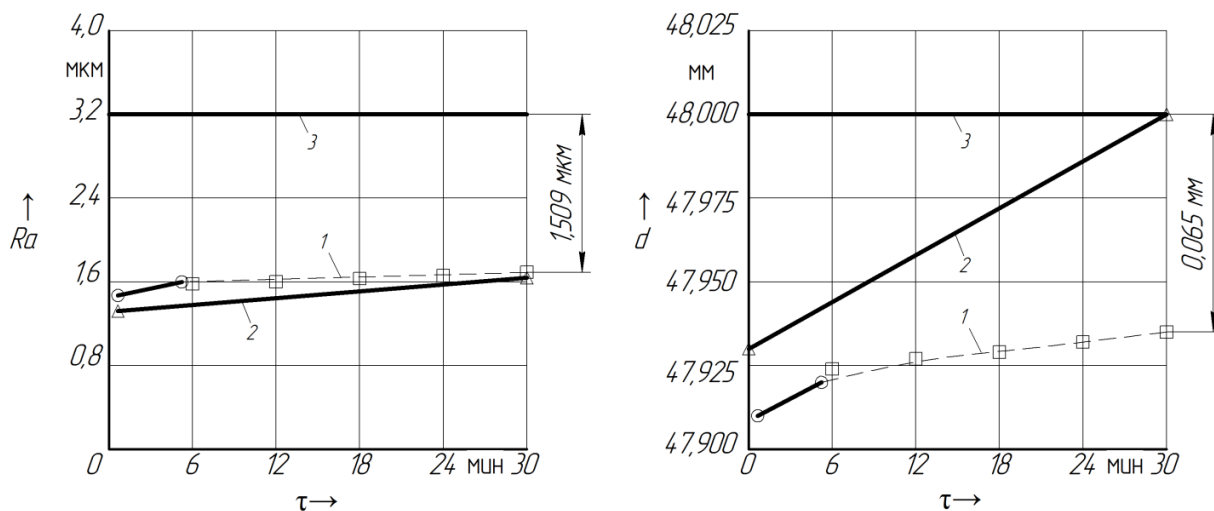


Рис. 4. Кривые изменений расчётных и фактических значений выходных параметров от времени  $\tau$  при режиме:  $S_{об} = 0,11$  мм/об;  $V = 142$  м/мин: 1 – кривая изменения фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданное значение выходных параметров

Результаты экстраполяции кривых свидетельствуют, что по обоим выходным параметрам в момент времени  $\tau_c = 30$  мин могут быть получены значительные положительные резервы (запасы). Следовательно, можно использовать более интенсивный режим обработки. С помощью программы получены значения элементов режима:  $S_{об} = 0,153$  мм/об;  $V = 143$  м/мин. Обработка на скорректированном режиме показала, что по обоим выходным

параметрам имеется положительный резерв (рис. 5). Однако, поскольку фактический резерв параметра  $Ra$  весьма мал, данный режим можно считать близким к оптимальному значению. В сравнении с режимом, рассчитанным по формулам теории резания, скорректированный режим позволяет увеличить производительность обработки на 39% и на протяжении заданного периода стойкости инструмента обеспечиваются заданные параметры качества.

Для определения экономической эффективности от использования результатов исследований в промышленности выполнен расчет и анализ технологической себестоимости, состоящей только из суммы тех издержек, которые непосредственно связаны с данным вариантом технологического процесса.

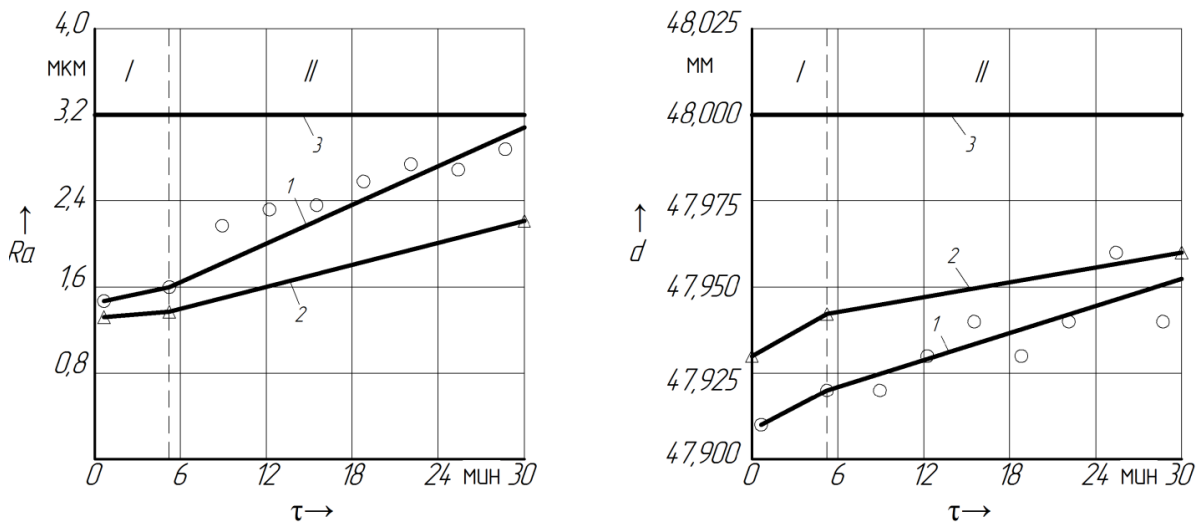


Рис. 5. Кривые изменений расчётных и фактических значений (участок II) выходных параметров от времени  $\tau$  при скорректированном режиме  $S_{об} = 0,153$  мм/об;  $V = 143$  м/мин: 1 – кривая изменений фактических значений выходных параметров; 2 – кривая изменения расчётных значений выходных параметров; 3 – заданное значение выходных параметров

Результаты опытно-промышленных испытаний методики коррекции режима точения в АО "ФРЕСТ" показали, что её применение позволяет интенсифицировать режим обработки заготовок, увеличив производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики коррекции назначенного в условиях неопределённости технологической информации режима механической обработки, в том числе с учётом изменяющихся во времени параметров процесса.

2. Разработаны математические модели для расчёта математического ожидания и рассеивания параметров процесса точения: диаметрального размера, параметра микрогеометрии обработанной поверхности, тангенциальной составляющей силы резания и температурного поля, учитывающие изменение механических и теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента в зависимости от температуры в зоне обработки.



3. Выполнено численное моделирование параметров процесса точения. Установлено влияние износа резца на контактные температуры и тангенциальную составляющую силу резания. Выявлено, что при разбросе значений напряжения текучести материала заготовки в пределах 20% диапазон рассеивания силы резания и контактных температур при точении составляет 18 ... 20%.

4. Получены зависимости для расчёта частных производных, используемых в формулах для определения интервала варьирования управляемыми параметрами в процессе коррекции режима.

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта функций, характеризующих изменение во времени средних арифметических значений и границ мгновенных полей рассеивания фактических значений выходных параметров и текущих показателей процесса точения.

6. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для коррекции режима точения.

7. Выполнена апробация разработанной методики и программного обеспечения коррекции режима точения. Коррекция режима позволила обеспечить увеличение производительности обработки на 25 ... 30 % без учёта и на 30 ... 35% с учётом изменяющихся во времени параметров процесса при обеспечении заданного качества деталей.

8. Результаты опытно-промышленных испытаний методики коррекции режима точения в АО "ФРЕСТ" показали, что ее применение позволяет увеличить производительность обработки на 25% при обеспечении требуемого качества деталей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Унянин, А.Н. Разработка и апробация методики назначения режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 1-2. – С. 297 – 301.

2. Унянин, А.Н. Разработка и исследование методики коррекции режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – № 2 (40). – С. 56 – 61.

3. Унянин, А.Н. Исследование температурного поля при точении с наложением вибраций / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 3(45). – С. 63 – 69.

4. Унянин, А.Н. Методика назначения режима механической обработки в условиях неопределенности технологической информации с изменяющимися во времени параметрами / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 3 (101). – С. 62 – 68.

5. Унянин, А.Н. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса обработки / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24, № 3(107). – С. 63 – 68.

### **Свидетельства интеллектуальной собственности**

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610980 Российская Федерация. Расчет температуры резания при точении с наложением вибраций: № 2021610045: заявл. 11.01.2021: опубл. 20.01.2021 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669693 Российская Федерация. Коррекция режима точения: № 2022669319: заявл. 20.10.2022: опубл. 24.10.2022 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669706 Российская Федерация. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации: № 2022669247: заявл. 20.10.2022: опубл. 24.10.2022 / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

### **Публикации в изданиях, индексируемых в системе Scopus**

9. Unyanin, A.N. Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09 – 13 September 2019. Vol. 709, 2, Issue 1. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 022034.

10. Unyanin, A.N. Numerical simulation of turning contact temperatures with varying material yield strength and tool wear / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07 – 11 September 2020. – Sevastopol, 2020. – P. 022036.

11. Unyanin, A.N. Research of the influence of the physical and mechanical properties of the workpiece material on the temperature field of the turning process / A. N. Unyanin, P. R. Finageev // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 300 – 308.

12. Unyanin, A.N. Research of the Influence of Cutting Conditions on the Temperature Field During Turning / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 271 – 277.