

На правах рукописи



РЕКА Надежда Георгиевна

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКОЙ МЕТАЛЛОВ НА
ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПО
РАСХОДУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Специальность 05.13.06

**Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (в машиностроении и приборостроении)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2016

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

За прошедшие 100 с лишним лет проблемы, связанные с обработкой металлов резанием, не потеряли актуальности, а скорее – возросли. Доля механообработки по трудоемкости при изготовлении деталей авиадвигателей составляет от 40 до 60 процентов от общего времени изготовления этих изделий.

Создание на научной основе систем управления процессами обработки металлов резанием и их применение повышает качество и эффективность производства изделий, в частности, ответственных деталей авиационной техники. Одним из элементов технологического процесса изготовления деталей является процесс лезвийной обработки металлов.

Однако, процесс лезвийной обработки металлов сопровождается широким спектром возмущений. Действие возмущений в процессе обработки детали вызывает отклонение параметров режима процесса резания от заданных значений, что снижает производительность и качество лезвийной обработки. Повышение эффективности процесса лезвийной обработки металлов является проблемой науки и современного производства.

Повышение эффективности процесса лезвийной обработки заключается в сокращении издержек на изготовление деталей за счет стабилизации заданного качества поверхностного слоя детали.

На основе анализа современной научной и технической литературы автором определено, что существенным способом повышения эффективности механообработки является применение систем автоматического регулирования (САР) параметров процесса резания. Основным параметром, регламентирующим эффективность лезвийной обработки, является температура в зоне резания. Однако, внедрению САР температуры в зоне резания (САРТ) препятствует отсутствие надежных систем контроля температуры. Существующие системы автоматического регулирования температуры в зоне резания не нашли широкого применения в промышленности. Причиной этого являются недостатки способов контроля температуры в зоне резания.

Создание системы автоматического измерения температуры в зоне резания, пригодной для промышленного внедрения, и построение САРТ на ее основе до настоящего времени является проблемой.

Вопросам измерения температуры в зоне резания и построению систем автоматического регулирования процессом резания посвящены труды современных ученых, имеются патенты, заявки на изобретения, что подтверждает актуальность решаемых в диссертации проблем.

Степень разработанности темы исследования

В соответствии с развитием технических средств автоматизации в середине прошлого столетия появились научные труды, посвященные вопросам автоматизации технологических процессов лезвийной обработки. К ним относятся труды ученых: Абакумова А. М., Видманова Ю. И., Михелькевича В. Н.; Гозмана Я. Б., Пиковского Ю. Д.; Зориктуева В. Ц.;

Силина С. С.; Подураева В. Н.; Соломенцева Ю. М.; Тверского М. М.; Исаева Ш. Г.; Лютова А. Г.; Никина А. Д., Месягутова И. Ф.; Григорьева С. Н., Терешина М. В., Кулагина О. А.; Карпова А. В.; Зубкова В. А. и др.

Технологический процесс лезвийной обработки не может быть представлен как объект управления без знания теории резания металлов. Основы теории резания металлов были заложены ещё в 18 веке. Основоположителем учения о резании металлов является Тиме И. А., впервые сформулировавший основные законы резания в 1870 г. В 1893 г. Зворыкин К. А. изложил оригинальную теорию процесса резания. В 1912 г. Усачев Я. Г. более подробно исследовал явления, происходящие при резании металлов.

Последователями развития теории резания являются ученые: Макаров А. Д., Резников А. Н., Бобров В. Ф., Лоладзе Т. Н., Безъязычный В. Ф., Грановский Г. И., Старков В. К. и другие.

Теме исследований, выполняемых в диссертации, посвящен ряд современных научных трудов отечественных ученых: Адаменко В. М., Мрочек Ж. А.; Лазуткиной Н. А.; Мухина В. С.; Смыслова А. М.; Постнова В. В.; Юрьева В. Л.; Кишурова В. М., Черникова П. П.; Таратынова О. В.; Бесекерского В. А., Попова Е. П.; Башарина А. В., Новикова В. А., Соколовского Г. Г.; Фираго Б. И., Павлячика Л. Б.; Плотникова А. Л., Жучкова Н. С., Курченко А. И., Солодкова В. А. и других.

Исследованиям процесса резания металла и его автоматизации также посвящены научные труды зарубежных ученых: М. Н. Dirikolu; В. А. Halil; I. Lazoglu, Y. Altintas; X. Luo, K. Cheng, R. Holt, X. Liu; Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan, T. Özel и других.

В базе данных Роспатента имеются заявки на изобретения, патенты, посвященные вопросам измерения температуры в зоне резания, определению эффективных режимов токарной обработки, стабилизации процесса резания на токарном оборудовании и другие.

Наличие современных научных трудов по тематике диссертации позволяет сделать вывод о том, что проблема автоматического управления технологическими процессами лезвийной обработки на основе измерения температуры в зоне резания, которую предполагается решать в диссертационной работе, находится на стадии поиска решения.

Область исследования

Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» «3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.», «4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация».

Объектом исследования является процесс лезвийной обработки металлов (применительно к процессу точения).

Предметами исследования являются зависимость температуры в зоне резания от расхода электроэнергии привода главного движения, способы определения и регулирования температуры.

Цель

Повышение эффективности процесса лезвийной обработки металлов за счет применения системы автоматического регулирования температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения.

Задачи

1. Исследовать связь расхода электроэнергии привода главного движения с температурой в зоне резания.

2. Разработать способ автоматического определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения.

3. Произвести анализ процесса лезвийной обработки металла и используемого при этом технологического оборудования как объектов управления, разработать их динамические модели.

4. Разработать структуру системы автоматического регулирования температуры в зоне резания на основе предложенного способа определения температуры, произвести ее моделирование, исследовать работоспособность и оценить эффективность.

Научная новизна результатов исследований

1. Разработана математическая модель связи расхода электроэнергии привода главного движения с температурой в зоне резания, отличающаяся от существующих тем, что при лезвийной обработке металла тепло образуется не в плоскости скалывания, а в объемном «нагреваемом теле», деформируемом под воздействием тангенциальной составляющей силы резания. Информативным параметром температуры в зоне резания является расход электрической энергии привода главного движения.

2. Предложен способ автоматического определения температуры в зоне резания, отличающийся от известных тем, что температура определяется по расходу электроэнергии привода главного движения с использованием предложенной в п. 1 модели.

3. Разработаны динамические модели процесса лезвийной обработки и технологического оборудования, отличающиеся от существующих тем, что в них учитываются параметрические и сигнальные возмущения, действующие на процесс лезвийной обработки и технологическое оборудование. Предложена методика анализа процесса резания и технологического оборудования как объектов управления, являющаяся алгоритмом разработки динамических моделей объектов управления.

4. Разработана, научно обоснована система автоматического регулирования температуры в зоне резания металла, структура которой отличается от существующих тем, что сигнал, пропорциональный температуре в зоне резания,

определяется вычислительным путем по модели, предложенной в п. 1, реализуемой при помощи измерительно-вычислительного комплекса (ИВК).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложен способ автоматического определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения, основанный на использовании закона сохранения энергии и уравнения теплового равновесия, позволяющий определять температуру непосредственно в зоне резания металла при формообразовании поверхности детали, не требующий доработки конструкции оборудования.

2. Предложена методика анализа процесса резания и технологического оборудования как объектов управления, отличающаяся от известных тем, что определяет порядок действий при разработке динамических моделей объектов управления. Разработанная методика может дополнить теорию автоматического управления разделом «анализ технологических процессов и оборудования как объектов управления». С применением данной методики разработаны динамические модели процесса точения и используемого технологического оборудования.

3. Разработана система автоматического регулирования температуры в зоне резания, применение которой в производстве обеспечивает стабилизацию заданных показателей качества поверхности детали, повышение производительности оборудования, стабилизацию заданной энергоэффективности процесса лезвийной обработки без изменения конструкции технологического оборудования.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались: теория дифференциальных уравнений, теория линейных систем автоматического регулирования, методы математического моделирования динамических систем, некоторые аспекты теории термодинамики, раздел механики физики, теоретическая механика, теория электрических цепей. Экспериментальные исследования выполнены методом имитационного моделирования с использованием пакетов прикладных программ SIMULINK MATLAB и EXCEL. Достоверность результатов исследований на модели подтверждена сравнением с результатами аналогичных исследований на натурном оборудовании.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель связи расхода электроэнергии привода главного движения с температурой в зоне резания, в которой учитывается, что при лезвийной обработке металла тепло образуется в объемном «нагреваемом теле», деформируемом под воздействием тангенциальной составляющей силы резания. Информативным параметром, определяющим температуру в зоне резания, является расход электрической энергии привода главного движения.

2. Способ автоматического определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения на процесс резания.

3. Динамические модели процесса лезвийной обработки и технологического оборудования, разработанные по предложенной в диссертации методике анализа процесса резания и технологического оборудования как объектов управления, в которых учитываются параметрические и сигнальные возмущения, действующие на процесс лезвийной обработки и технологическое оборудование.

4. Структура системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла, в которой в качестве обратной связи по температуре в зоне резания используется сигнал, полученный вычислительным путем при помощи ИВК по модели, предложенной в диссертационной работе.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследований на имитационной модели подтверждена сравнением с результатами аналогичных исследований на натурном образце.

По теме исследований опубликованы всего 15 научных статей, 3 из них в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 из которых входят в международную реферативную базу данных Scopus.

Основные результаты и положения данной диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 всероссийских и 2 международных конференциях.

Получен патент на «Способ определения температуры в зоне резания металла» №2585917, опубл. 10.06.2016 г. (заявка на изобретение №2014148819/02, 03.12.2014г.).

Материалы диссертации подготовлены в рамках научно-исследовательской работы (НИР) № 2155 по теме «Инновационные мехатронные и ионно-плазменные нанотехнологии высокоточного формообразования и упрочнения деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок». Основанием для проведения НИР является задание №2014/240 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ.

Опубликованы методические рекомендации «Теория автоматического управления технологическими процессами» к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления технологическими процессами».

Личный вклад автора

Модели, алгоритмы и методики, эксперименты, проведенные на имитационных моделях, анализ и интерпретация результатов экспериментов, представленные в диссертации, получены автором лично.

«Способ определения температуры в зоне резания металла» разработан в соавторстве с научным руководителем д.т.н., профессором Лютовым А. Г. и сотрудником кафедры «Автоматизация технологических процессов» к.т.н., доцентом Коуровым Г. Н.

Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнено автором при активном участии научного руководителя д.т.н., профессора Лютова А. Г.

В перечисленных работах соискателем лично получены следующие результаты:

– в работах [8, 9, 11] установлена и доказана эффективность применения математических моделей процесса резания при управлении режимами лезвийной обработки;

– в работах [5, 7, 10] произведен анализ существующих способов измерения температуры в зоне резания; разработана математическая модель связи расхода электроэнергии привода главного движения и температуры в зоне резания; произведен анализ процесса резания как объекта управления; доказана необходимость построения системы автоматического регулирования температуры в зоне резания;

– в работе [3] предложен подход к решению проблемы определения температуры в зоне резания металла по температуре «нагреваемого тела»; выдвинута гипотеза о «нагреваемом теле», проведен эксперимент по проверке данной гипотезы; процесс нагрева «нагреваемого тела» представлен в виде динамического звена;

– в патенте [4] представлен способ определения температуры в зоне резания металла по расходу электроэнергии привода главного движения на процесс резания;

– в работах [1, 2] разработана динамическая модель электродвигателя привода главного движения токарного станка с учетом параметрических и сигнальных возмущений, действующих на электродвигатель; разработаны динамические модели элементов канала управления температурой в зоне резания металла при токарной обработке;

– в работе [15] разработана модель измерителя температуры в зоне резания, использованная при создании системы автоматического регулирования температуры в зоне резания;

– в работах [6, 12, 13] произведено математическое описание электрической машины постоянного тока во взаимосвязи с процессом резания с учетом переменности их параметров; разработана динамическая модель связи момента электрической машины с тангенциальной составляющей силы резания; предложен способ определения тангенциальной составляющей силы резания по току привода главного движения, разработана функциональная схема измерителя тангенциальной составляющей силы резания;

– в работе [14] исследованы причины и дано объяснение нелинейности зависимости температуры в зоне резания от скорости резания; установлена зависимость энергоэффективности процесса резания от скорости и температуры в зоне резания по модели процесса резания, построенной на основании закона сохранения энергии;

– в работе [16] представлена методика анализа процесса резания как объекта управления, приведен пример анализа процесса резания как объекта управления, в качестве объекта управления рассмотрен процесс торцового точения на токарном станке.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – [5, 8, 9, 11]; по главе 2 – [1, 3, 4, 10]; по главе 3 – [2, 6, 7, 12]; по главе 4 – [13, 15]; по главе 5 – [14]. Шесть работ написаны автором единолично, другие совместно с научным руководителем или другими членами научного коллектива. В методических рекомендациях [16] представлен материал, отражающий содержание главы 3 диссертационной работы. Методические рекомендации написаны автором совместно с научным руководителем и сотрудником кафедры.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы приняты к использованию на ЗАО Уральское предприятие «Росводоканал» (г. Уфа), ОАО «Башкоммунэнерго» (г. Уфа). Приняты к использованию динамические модели асинхронных двигателей и машин постоянного тока, методика анализа технологических систем как объектов управления, система автоматического регулирования температуры в зоне резания.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» в виде методики анализа технологических процессов и оборудования как объектов управления, используемой при выполнении курсовых работ, выпускных квалификационных работ бакалавров, а также используемой при проведении научно-исследовательских работ и выпускных квалификационных работ магистрантов.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов. Содержит 174 страницы машинописного текста, библиографический список из 108 наименований, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены: проблема и актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, область исследования, объект и предмет исследования, цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов, объем и структура работы.

В главе 1 произведен анализ источников научной информации, подтверждающий актуальность решаемых в диссертации проблем.

В диссертации для анализа эффективности процесса лезвийной обработки рассмотрены наиболее часто используемые алгоритмы управления процессом резания:

1) управление по критерию поддержания оптимальной температуры в зоне резания;

2) управление по критерию достижения максимальной производительности;

3) управление по критерию стабилизации заданной энергоэффективности.

Произведен анализ существующих представлений о процессе резания. Определено, что при управлении процессом резания основным параметром, регламентирующим эффективность лезвийной обработки, является температура в зоне резания металла. Рассмотрена энергетика процесса резания. Исследованы существующие способы контроля температуры в зоне резания металла. Предложена классификация способов измерения температуры в зоне резания по критерию применимости в системах автоматического регулирования (САР). Учитывая современные литературные и патентные источники, сделан вывод, что до настоящего времени проблемы автоматического регулирования процесса лезвийной обработки, повышение эффективности процесса лезвийной обработки и измерение температуры в зоне резания являются актуальными. Для повышения эффективности процесса лезвийной обработки и качественного регулирования процесса резания предлагается создать САРТ.

В главе 2 выдвинута гипотеза о связи температуры в зоне резания металла с расходом электроэнергии привода главного движения на процесс резания.

Произведен анализ существующих моделей связи температуры в зоне резания с параметрами процесса резания. Недостатками существующих моделей являются:

– в них не раскрыта физическая сущность связи параметров процесса резания с температурой в зоне резания;

– модели связи температуры с параметрами резания не учитывают динамические процессы тепловых явлений;

– существующие модели работают в узком диапазоне изменения параметров процесса резания.

Исследованиями П. Л. Ребиндера, Г. И. Епифанова, С. С. Можаяева, Г. И. Грановского и др. установлено, что при резании металлов более 99,5% работы резания переходит в тепло. Это позволяет, воспользовавшись законом сохранения энергии (1) и уравнением теплового равновесия, представленным в дифференциальной форме, установить связь между расходом механической энергии и температурой в зоне резания.

$$Q_M = Q_n + Q_u, \quad (1)$$

где Q_M – механическая энергия, затрачиваемая на процесс резания, Q_n – тепловая энергия, нагревающая массу деформируемой в процессе резания части заготовки, переходящей в стружку Q_u – тепловая энергия, отводимая из зоны резания.

Закон сохранения энергии для процесса резания может быть представлен в виде:

$$P_{рез} \cdot d\tau = c \cdot m \cdot d\lambda + F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau, \quad (2)$$

где левая часть $P_{рез} \cdot d\tau$ представляет собой механическую энергию, поступающую в зону резания от привода главного движения. Первое слагаемое правой части уравнения $c \cdot m \cdot d\lambda$ – тепловая энергия, нагревающая массу m , деформируемой части стружки; m – нагреваемая масса части обрабатываемого материала, подвергающегося деформации и превращающегося в стружку под действием тангенциальной составляющей силы резания; c – удельная теплоемкость нагреваемой массы; λ – разность температур нагреваемой массы и охлаждающей среды (среднее значение), определяется по выражению (3) (охлаждающей средой являются стружка, деталь, инструмент, воздух или СОЖ). Второе слагаемое правой части уравнения $F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau$ представляет собой тепловую энергию, отдаваемую нагревающейся массой в охлаждающую среду; F_T – площадь теплоотдачи нагревающейся массы; K_T – коэффициент теплоотдачи нагревающейся массы в охлаждающую среду.

$$\lambda = \theta - \theta_{OC}, \quad (3)$$

где θ – температура в зоне резания металла; θ_{OC} – температура охлаждающей среды.

Механическая энергия $P_{рез} \cdot d\tau$, поступающая в зону резания, создается электрической машиной. Электрическая машина является электромеханическим преобразователем. В ней электрическая энергия забирается из сети и превращается в механическую. Учитывая, что в рассматриваемой системе привод главного движения оборудован электроприводом с асинхронным двигателем, полезная мощность, расходуемая электрической машиной определяется выражением:

$$P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

где P – полезная мощность двигателя, потребляемая из сети и передаваемая в нагрузку; U_{ϕ} – фазное напряжение двигателя; I_{ϕ} – ток фазы двигателя; η – КПД двигателя; $\cos \varphi$ – отношение активной мощности к потребляемой.

Однако, не вся полезная мощность электродвигателя расходуется на выполнение процесса резания:

$$P_{рез} = P - P_{ХХ}, \quad (5)$$

где $P_{рез}$ – мощность, расходуемая на выполнение процесса резания; $P_{ХХ}$ – мощность холостого хода двигателя совместно с перемещающимися частями привода главного движения.

Таким образом, связь разности температур λ с расходом электроэнергии на процесс резания может быть установлена по выражению:

$$3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{рез} \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot d\tau = c \cdot m \cdot d\lambda + F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau, \quad (6)$$

где $I_{рез} = I_{\phi} - I_{ХХ}$, $I_{рез}$ – ток, соответствующий мощности, расходуемой на процесс резания, $I_{ХХ}$ – ток, соответствующий мощности холостого хода.

В результате анализа уравнения (2) напрашивается гипотеза, что в процессе резания тепло возникает не в плоскости скалывания, а в объемном теле обрабатываемого материала, подвергающегося деформации и превращающегося в

стружку под действием тангенциальной составляющей силы резания. Для удобства изложения дальнейшего материала объемное тело обрабатываемого материала, подвергающееся деформации и превращающееся в стружку под действием тангенциальной составляющей силы резания, автором названо «нагреваемым телом». Нагреваемое тело имеет объем V_{HT} , и массу m .

Определение величин объема и массы нагреваемого тела является нерешенной проблемой.

В простейшем случае объем нагреваемого тела предлагается представить в виде параллелепипеда $ADBCA_1D_1B_1C_1$ (рисунок 1). Объем параллелепипеда определяется параметрами режима процесса резания.

По параметрам параллелепипеда с учетом плотности ρ материала определяется масса нагреваемого тела. Зная массу и параметры объема нагреваемого тела, можно рассчитать разность температур λ и температуру в зоне резания θ .

Процесс нагрева нагреваемого тела описан дифференциальным уравнением первого порядка (2), что даёт возможность представить процесс нагрева нагреваемого тела в виде динамического звена, передаточная функция которого $W(p)$ описана уравнением (7), устанавливающим связь между мощностью резания $P_{рез}$ и разностью температур λ :

$$W(p) = \frac{\lambda(p)}{P_{рез}(p)} = \frac{1}{F_T \cdot K_T \left(\frac{c \cdot m \cdot p}{F_T \cdot K_T} + 1 \right)}. \quad (7)$$

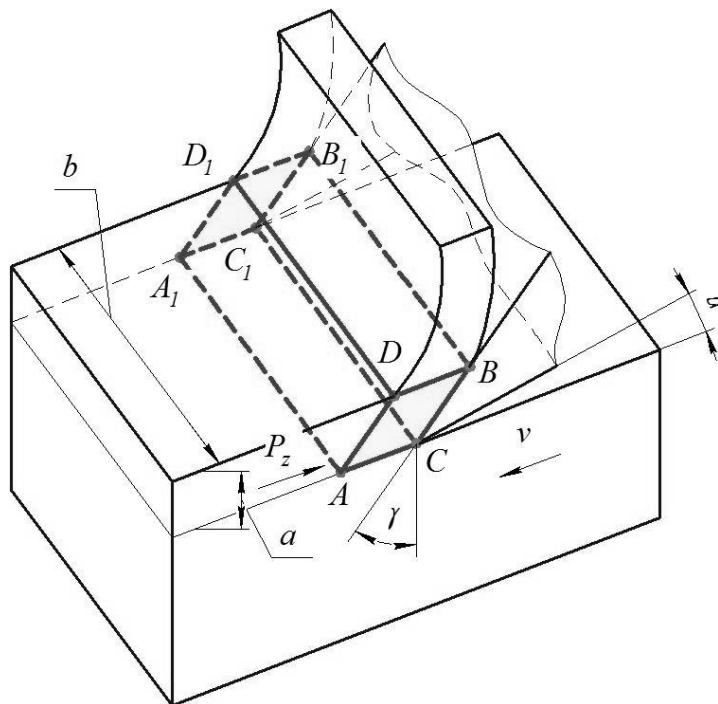


Рисунок 1 – Схема формирования нагреваемого тела (α – задний угол резца; γ – передний угол резца, a – толщина срезаемого слоя, b – ширина срезаемого слоя)

В уравнениях (2, 6, 7) масса нагреваемого тела гипотетическая. Для проверки и подтверждения гипотезы о нагреваемом теле автором диссертации разработан и произведен вычислительный эксперимент по сравнению массы m_T параллелепипеда и массы нагреваемого тела m_{Σ} , рассчитанной по закону сохранения энергии (2), для одних и тех же условий резания, при которых проведен натурный эксперимент Макарова А. Д. Сравнительные расчеты произведены для процесса торцового точения при различных значениях подачи и постоянных значениях глубины резания и температуры в зоне резания.

Графики зависимостей масс нагреваемого тела m_T и m_{Σ} от подачи s представлены на рисунке 2.

Визуальное сопоставление полученных графиков (рисунок 2) указывает на их качественное сходство.

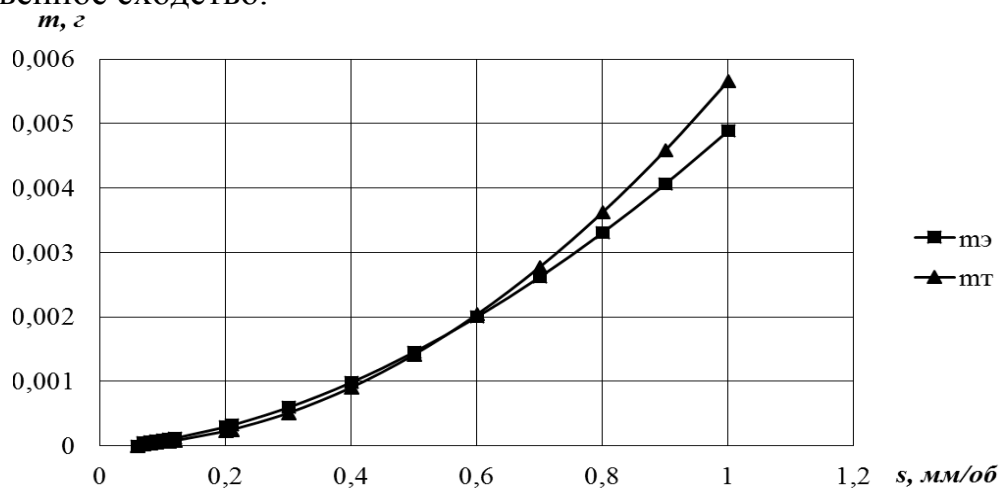


Рисунок 2 – Графики зависимостей масс нагреваемого тела m_T и m_{Σ} от подачи s при торцовом точении

На основании проведенного вычислительного эксперимента подтверждена гипотеза о нагреваемом теле сделан вывод о возможности аппроксимации нагреваемого тела параллелепипедом.

Для определения формы, объема и массы нагреваемого тела при других видах обработки и для других материалов, необходимо продолжить исследования. При исследовании данного вопроса следует иметь в виду, что значение массы m_{Σ} является приближенным, так как для ее расчета использованы эмпирические уравнения, имеющие ряд коэффициентов, полученных экспериментальным путем.

Таким образом на основании гипотезы о связи температуры в зоне резания с расходом электроэнергии привода главного движения на процесс резания и гипотезы о нагреваемом теле предложен способ определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения. Этот способ заключается в моделировании связи температуры в зоне резания с расходом электроэнергии привода главного движения по уравнению (7). Предлагаемый способ позволяет определять температуру непосредственно в зоне резания металла непрерывно в процессе формообразования поверхности детали по

штатным измерительным устройствам, чаще всего имеющимся в комплекте электропривода, и не требует модернизации механической части станка.

В главе 3 произведен анализ технологического оборудования и процесса резания металла как объектов управления, разработаны их динамические модели.

Для этого автором предложена методика анализа процесса резания и элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания как объектов управления, являющаяся алгоритмом разработки динамических моделей объектов управления.

В результате анализа процесса резания и элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания как объектов управления разработана функциональная схема (рисунок 3), на основании которой разработана структурная схема. Сделан вывод о необходимости создания САРТ.

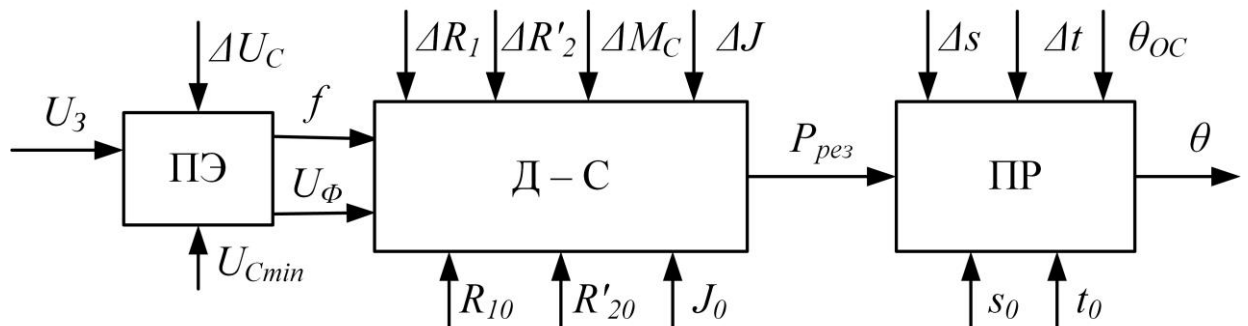


Рисунок 3 – Функциональная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания как объекта управления

На рисунке 3 U_3 – управляющая координата – напряжение задания, θ – выходная координата – температура в зоне резания металла, ΔU_C , ΔR_1 , $\Delta R'_2$, ΔM_C , ΔJ , Δs , Δt , θ_{oc} – возмущения, U_{Cmin} , R_{10} , R'_{20} , J_0 , s_0 , t_0 – входные параметры, ПЭ – преобразователь энергии, Д-С – электродвигатель привода главного движения с системой механических передач станка, ПР – процесс резания металла.

Кроме того, в данной главе произведено математическое описание канала управления подачей. Выполнен анализ канала управления подачей как объекта управления. Разработана структурная схема канала управления подачей. Сделан вывод о необходимости создания САР подачи.

В главе 4 разработана САРТ, функциональная схема которой представлена на рисунке 4.

Для повышения точности САРТ произведена компенсация возмущений каждого элемента системы за счет применения локальных САР.

Тангенциальная составляющая силы резания P_Z является элементом, формирующим температуру в зоне резания. Непосредственное измерение величины P_Z представляет определенные сложности. Поэтому в данной работе предлагается определять величину P_Z косвенным методом по току электрической машины привода главного движения. Разработана динамическая модель измерителя тангенциальной составляющей силы резания на основе измерения

тока электропривода главного движения, представлена в работе в виде структурной схемы.

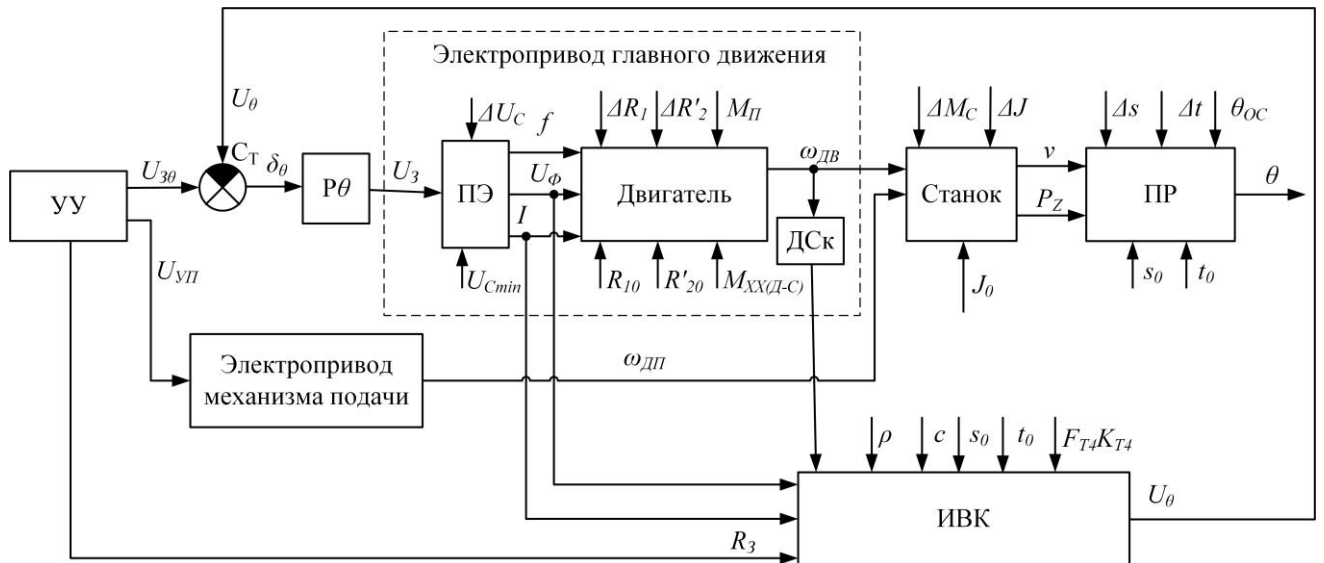


Рисунок 4 – Функциональная схема САРТ ($U_{3\theta}$ – напряжение управления температурой в зоне резания металла; U_{θ} – напряжение, пропорциональное температуре в зоне резания; δ_{θ} – ошибка регулирования; УУ – устройство управления; P_{θ} – регулятор температуры в зоне резания; ДСк – датчик скорости вращения вала двигателя привода главного движения; ИВК – измерительно-вычислительный комплекс; $U_{уп}$ – напряжение управления электропривода механизма подачи; C_{Σ} – сумматор)

Разработана динамическая модель измерителя температуры в зоне резания металла. В САРТ измеритель температуры в зоне резания построен с использованием предлагаемой в данной работе модели связи расхода электрической энергии на процесс резания с температурой в зоне резания, которая реализована с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК). Определение температуры осуществляется автоматически, косвенным методом, заключающемся в следующем. Измеряется мощность привода главного движения, расходуемая на процесс резания и преобразуется в температуру в зоне резания в соответствии с уравнениями (3) и (8), полученным из выражения (7).

$$\lambda(p) = P_{рез}(p) \cdot W(p). \quad (8)$$

Модели передаточной функции $W(p)$ и уравнения (3) программируются в режиме реального времени. Напряжение U_{θ} , полученное на выходе ИВК (рисунок 4), пропорционально натурному значению температуры в зоне резания θ .

При наличии избыточной вычислительной мощности управляющего устройства УУ (рисунок 4), модели передаточной функции $W(p)$ и уравнения (3) могут быть запрограммированы в УУ.

Структурная схема измерителя температуры представлена на рисунке 5. Она реализует алгоритм вычисления температуры в зоне резания.

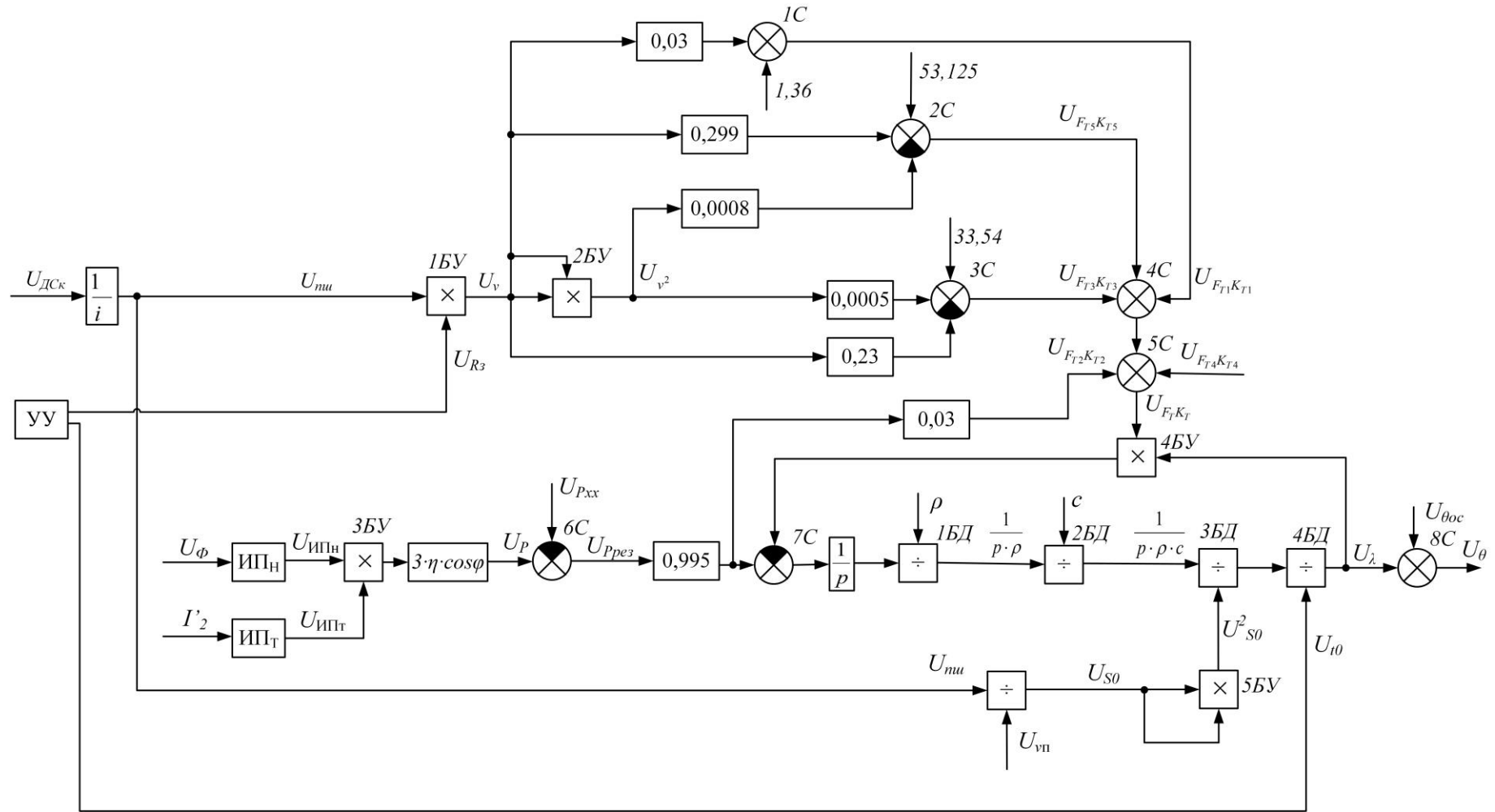


Рисунок 5 – Структурная схема модели измерителя температуры на базе датчиков напряжения и тока двигателя привода главного движения (БД – блок деления; на рисунке обозначены напряжения, пропорциональные соответствующим величинам)

Температура в зоне резания зависит не только от тепловой мощности, поступающей в нагреваемое тело, но и тепловой мощности, отводимой нагреваемым телом в охлаждающую среду. Тепловая мощность, отводимая нагреваемым телом имеет несколько составных частей. Каждая из частей зависит от скорости резания. Для более точного определения температуры нагреваемого тела произведено математическое описание этих зависимостей, построены их ориентировочные графики (суммарная ошибка достоверности аппроксимации кривых составляет 7%, что от общего расхода энергии составляет не более 2,5%).

Произведен анализ точности определения температуры в зоне резания. Точность регулирования температуры в зоне резания определяется двумя факторами: точностью исполнительной системы и точностью измерителя температуры. Исполнительная система имеет астатические локальные САР. То есть, задание режимов работы управляющим устройством выполняется с точностью измерительных устройств, имеющих классы точности. Измеритель температуры построен с использованием ИВК на основе предлагаемой в данной работе модели связи расхода электроэнергии на процесс резания с температурой в зоне резания. В модели учтен расход энергии, поступающей в нагреваемое тело и отдаваемой им. Это обеспечивает высокую точность определения температуры.

Таким образом, учитывая высокую точность реализации заданных значений параметров процесса резания исполнительной системой, учитывая, что модель процесса нагрева нагреваемого тела выполнена с достаточно высокой точностью, при правильном назначении плотности и удельной теплоемкости обрабатываемого материала, можно считать, что точность регулирования САРТ укладывается в пределы инженерной точности – не более $\pm 2,5\%$ оптимальной температуры в зоне резания, определенной для проведенного эксперимента.

В главе 5 проведены исследования работоспособности САРТ на имитационной модели, построенной в лицензионном пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB.

Определены параметры оборудования, применяемого для моделирования САРТ. Модельный эксперимент произведен с использованием модели токарно-винторезного станка 16К20Ф3. Привод главного движения включает в себя двигатель Русэлком АДЧР160S6 и преобразователь частоты Русэлком RI100-011G. Электропривод подачи включает в себя двигатель с тахогенератором 4ПБМ132МГО4 и преобразователь энергии ЭПУ1М-2-3447ДУХЛ4.

По моделям исследованы статические и динамические характеристики всех элементов, входящих в САРТ. Произведен анализ и синтез локальных САР. Исследованы статические и динамические характеристики локальных САР.

Исследованы статические и динамические характеристики модели процесса резания. Произведено сравнение регулировочных характеристик $\theta=f(v)$ модели процесса резания с регулировочными характеристиками, полученными Макаровым А. Д. на натурной технологической установке. Графики изменения температуры при различных значениях подачи, полученные на модели и на реальном оборудовании (рисунок 6), имеют качественную сходимость.

Следовательно, разработанную в диссертации модель процесса лезвийной обработки можно считать адекватной реальному процессу резания, так как закономерности изменения температуры при различных значениях подачи, полученные в результате эксперимента на имитационной модели, соответствуют закономерностям, полученным при натуральных исследованиях А. Д. Макарова.

Исследовано взаимодействие процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок». При этом установлено, что регулировочная характеристика зависимости $v=f(U_3)$ скорости резания v от напряжения задания U_3 , подаваемого на вход электропривода главного движения станка, представляет собой линейную зависимость. Получены регулировочные характеристики взаимодействия процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок» $\theta=f(U_3)$ при различных значениях подач: $s = 0,084, 0,21, 0,3$ мм/об. Произведено их сопоставление с регулировочными характеристиками, полученными Макаровым А. Д. на натурной установке. Совмещенные графики регулировочных характеристик $\theta=f(v, U_3)$ представлены на рисунке 6.

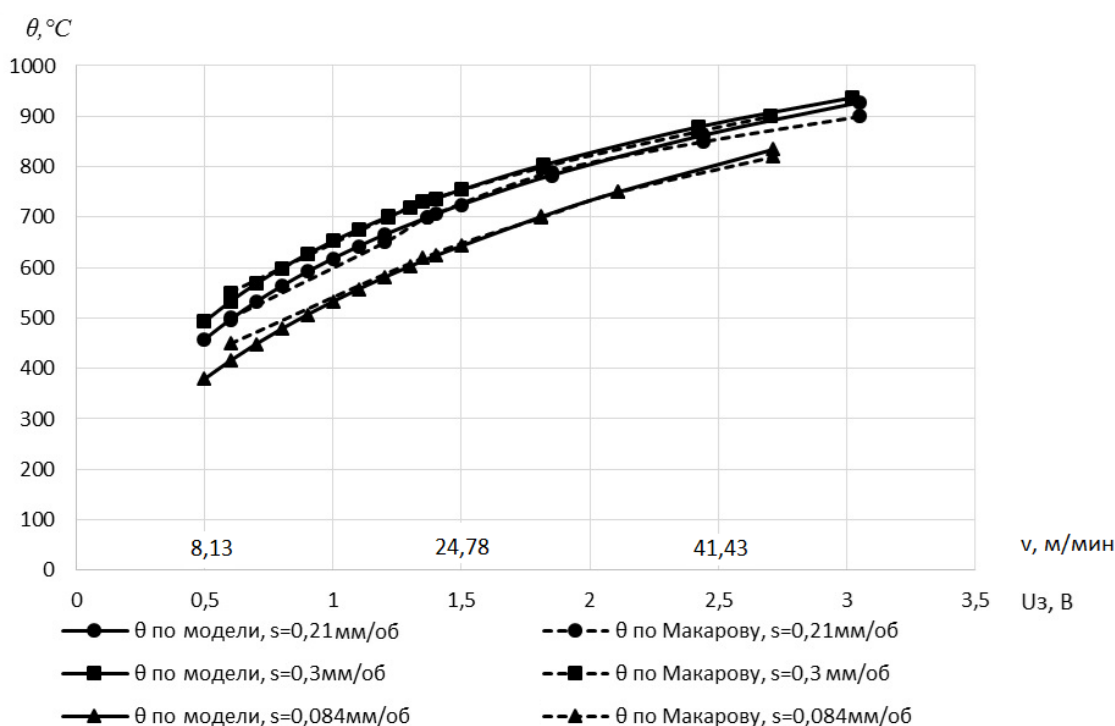


Рисунок 6 – Совмещенные графики регулировочных характеристик $\theta=f(v, U_3)$ при различных значениях подач

Из проведённых исследований можно сделать вывод об адекватности имитационной модели процесса резания реальному процессу резания.

Регулировочные характеристики зависимости температуры от скорости резания (рисунок 6) имеют нелинейный характер. В результате моделирования установлена причина нелинейности этих зависимостей.

В существующей научной литературе нет объяснений нелинейности регулировочных характеристик $\theta=f(v)$ с точки зрения физических явлений.

Автором диссертации выдвигается гипотеза, что нелинейность этих зависимостей объясняется особенностями динамических характеристик нагрева нагреваемого тела.

На рисунке 7 приведена зависимость установившегося $\theta_{УСТ}$ и фактического $\theta_{СА}$ значения температуры от скорости резания. Фактическое значение температуры в зоне резания с ростом скорости вначале увеличивается, затем происходит снижение температуры. Таким физическим явлением можно объяснить снижение температуры при высокоскоростном резании.

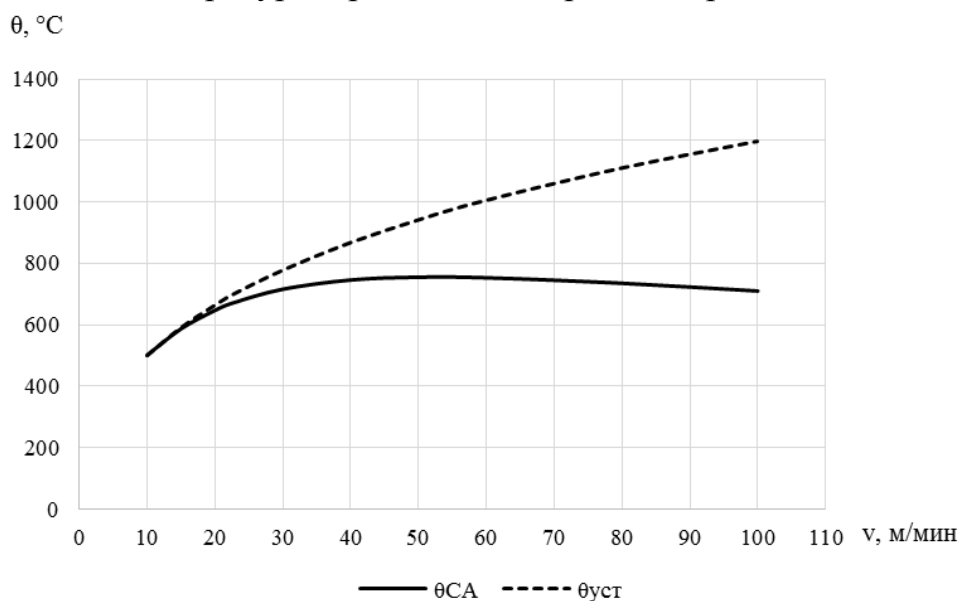


Рисунок 7 – Зависимости температуры в зоне резания $\theta_{СА}$ и установившейся температуры $\theta_{УСТ}$ от скорости резания, полученные на модели процесса резания при $s=0,21$ мм/об, $t=1$ мм

Получены статические и динамические характеристики САРТ. САРТ исследована на действие возмущений при разомкнутом и замкнутом состоянии (рисунок 8).

При совместном действии всех возмущений в разомкнутом состоянии САРТ температура в зоне резания может отклоняться на (45-50)% от заданного значения. Статическая ошибка регулирования в замкнутом состоянии САРТ, благодаря наличию интегральных регуляторов, определяется точностью измерительных устройств, имеющих соответствующие классы точности. При действии возмущений Δs , Δt в виде единичного скачка в замкнутой САРТ возникает динамическая ошибка, параметры которой определяются настройкой регулятора. В процессе резания поступление возмущений Δs , Δt в виде единичного скачка, как правило, не возникает, поэтому динамическая ошибка САРТ уменьшается. При выбранных в работе параметрах регуляторов динамическая ошибка компенсируется в течение 0,8с (рисунок 8).

Переходные процессы по управляющему воздействию и возмущениям являются апериодическими. Устойчивость САРТ проверена по логарифмическому критерию устойчивости.

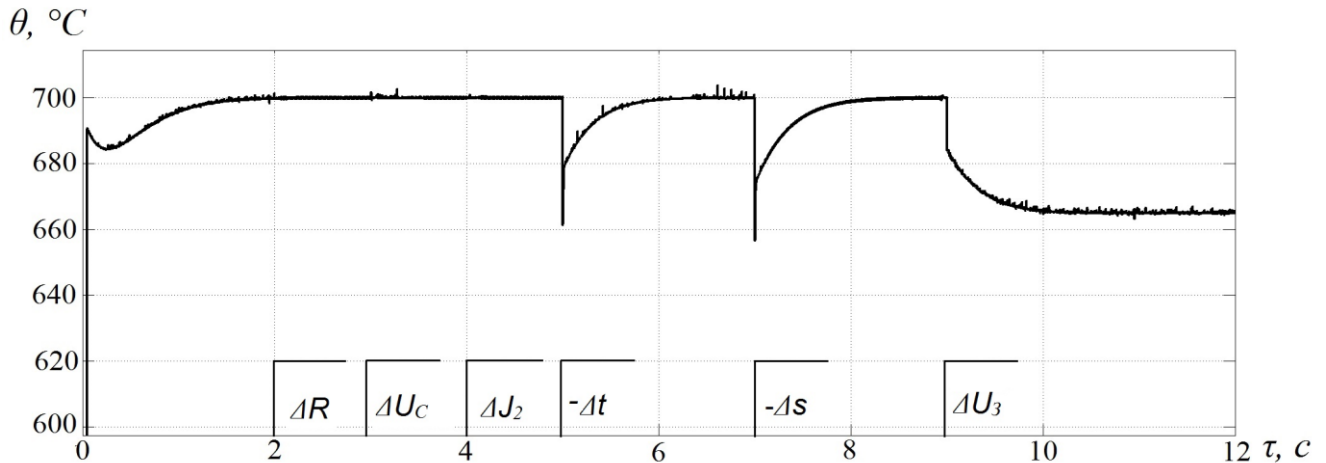


Рисунок 8 – Динамика изменения температуры в зоне резания при действии возмущений и изменении управляющего воздействия: на 2с при увеличении сопротивления обмоток ротора и статора двигателя привода главного движения на $\Delta R'_2 + \Delta R_I = 0,25 \cdot (R'_{20} + R_{I0})$ Ом, на 3с при увеличении напряжения сети на $\Delta U_C = 0,3 \cdot U_{Cmin}$ В, на 4с при увеличении момента инерции обрабатываемой детали на $\Delta J_2 = 0,5 \cdot J_{20}$ кг·м², на 5с при уменьшении глубины резания на $\Delta t = 0,1 \cdot t_0$ мм, на 7с при уменьшении подачи на $\Delta s = 0,15 \cdot s_0$ мм/об, на 9с при уменьшении управляющего воздействия на $\Delta U_3 = 0,05 \cdot U_3$ В

Сравнительная оценка эффективности процесса лезвийной обработки металлов с применением и без применения САРТ

В работе определено, что в результате совместного действия возмущений на процесс резания и технологическое оборудование без применения САРТ, температура в зоне резания может отклоняться от заданного оптимального значения на (45-50)%.

Произведена сравнительная оценка эффективности процесса лезвийной обработки при различных критериях управления относительно нерегулируемого процесса резания.

1. При управлении по критерию поддержания оптимальной температуры в зоне резания.

Например, при неавтоматизированном управлении процессом резания, увеличение температуры в зоне резания относительно заданного оптимального значения на 11% (по Макарову А. Д.) снижает количество деталей, обработанных за одну настройку инструмента, на 73%, а при уменьшении температуры на 28% количество обработанных деталей уменьшается на 40%.

Согласно исследованиям, проведенным в диссертационной работе, при использовании САРТ температура может отклоняться только на $\pm 2,5\%$.

2. При управлении по критерию максимальной производительности (форсированные режимы – высокоскоростная обработка (ВСО)).

Эффективность применения САРТ в данном случае можно подтвердить, пользуясь результатами исследований предприятия ОАО «НПП «Аэросила» в области ВСО, представленными на выставке «Металлообработка 2008». В

соответствии с этими результатами цикл изготовления при обработке деталей методом ВСО в 6 раз меньше, чем цикл обработки аналогичных деталей на обычных режимах резания. В соответствии с общемашиностроительными нормативами, с целью предотвращения перегрева инструмента, режимы высокоскоростной обработки назначены с учетом коэффициента запаса, обусловленного колебанием температуры в зоне резания от действия возмущений. Применение разработанной САРТ позволяет стабилизировать температуру в зоне резания в пределах $\pm 2,5\%$, что дает возможность уменьшить величину коэффициента запаса и повысить производительность обработки более, чем в 6 раз.

3. При управлении по критерию стабилизации заданной энергоэффективности.

Для проведенных в диссертации экспериментов определен нормативный показатель энергоэффективности для оптимального режима резания. Он составляет $K_{эф} = 8,61 \text{ кН} \cdot \text{мм} / \text{мм}^3$. При повышении температуры относительно заданного оптимального значения показатель энергоэффективности снижается, что вызывает дополнительные издержки электроэнергии на единицу продукции, при понижении температуры в зоне резания показатель энергоэффективности растет, при этом снижается качество изготавливаемых деталей.

Основные выводы и результаты

1. Выполнен аналитический обзор существующих систем управления лезвийной обработкой металлов и способов определения температуры в зоне резания.

Существующими исследованиями доказано, что 99,5% механической энергии, расходуемой на процесс лезвийной обработки, переходит в тепло. Это позволяет, воспользовавшись законом сохранения энергии и уравнением теплового равновесия, представленным в дифференциальной форме, установить связь между расходом механической энергии и температурой в зоне резания. Механическая энергия для процесса резания создается электродвигателем привода главного движения, который превращает электрическую энергию в механическую. Таким образом, измеряя расход электроэнергии можно судить о температуре в зоне резания.

Установлено, что в существующих моделях связи температуры с параметрами режима процесса резания тепло образуется в плоскости скалывания, модели работают в узком диапазоне изменения параметров режима процесса резания, не раскрывают физической сущности связи параметров режима процесса резания с температурой в зоне резания и не учитывают динамические процессы тепловых явлений.

Разработана математическая модель связи расхода электроэнергии привода главного движения с температурой в зоне резания, отличающаяся от существующих тем, что при лезвийной обработке металла тепло образуется не в плоскости скалывания, а в объемном «нагреваемом теле», деформируемом под

воздействием тангенциальной составляющей силы резания, информационным параметром для определения температуры в зоне резания при этом является расход электрической энергии привода главного движения. Разработанная модель устраняет недостатки существующих моделей процесса резания металла.

2. Разработан способ автоматического определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения, отличающийся от известных тем, что измеряется расход энергии в единицу времени (мощность) привода главного движения станка. Из полученной мощности вычитается мощность холостого хода механической части механизма вращения шпинделя, а также мощность, расходуемая на расход инструмента. Таким образом определяется мощность, расходуемая на процесс резания, 0,5% этой мощности не идет на нагрев зоны резания. Сигнал, пропорциональный мощности резания, поступает на ИВК, реализующий предложенную в диссертации модель связи расхода электроэнергии привода главного движения с температурой в зоне резания. Выходной сигнал ИВК пропорционален температуре в зоне резания. (Предварительные расчеты показывают, что предложенный способ позволяет определять температуру в зоне резания с точностью $\pm 2,5\%$).

Реализация данного способа не требует доработки конструкции технологического оборудования.

3. Разработаны динамические модели процесса лезвийной обработки и технологического оборудования, отличающиеся от существующих тем, что в них учитывается действие параметрических и сигнальных возмущений. Предложена методика анализа процесса резания и технологического оборудования как объектов управления, являющаяся алгоритмом разработки динамических моделей объектов управления. Без динамических моделей невозможно построение замкнутой системы автоматического управления.

4. Разработана система управления лезвийной обработкой металлов на основе определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения (САРТ) с использованием предлагаемого способа автоматического определения температуры в зоне резания, применение которой возможно в промышленности. Произведено имитационное моделирование в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB и исследована работоспособность САРТ. Определена точность регулирования выходной координаты. Точность регулирования САРТ регламентируется датчиками тока и напряжения (их классом точности), измеряющими мощность двигателя привода главного движения, и выбором интегрального регулятора температуры в зоне резания.

Автором установлено, что в результате совместного действия возмущений на процесс резания и оборудование без применения САРТ, температура в зоне резания может отклоняться от заданного оптимального значения на (45-50)%. Согласно исследованиям, проведенным в диссертационной работе, при использовании САРТ температура может отклоняться на $\pm 2,5\%$.

Об эффективности применения САРТ можно судить при сравнении с натурными исследованиями А. Д. Макарова, в которых установлено, что при управлении по критерию поддержания оптимальной температуры резания при неавтоматизированном управлении увеличение температуры резания относительно заданного оптимального значения на 11% снижает количество деталей, обработанных за одну настройку инструмента, на 73%, а при уменьшении температуры на 28% количество деталей уменьшается на 40%.

Эффективность применения САРТ при управлении по критерию максимальной производительности (форсированные режимы - высокоскоростная обработка (ВСО)) можно оценить, проанализировав материалы выставки «Металлообработка 2008». Например, при обработке деталей методом ВСО, цикл изготовления составил 80 ч, а при обработке на обычных режимах цикл изготовления составляет 480 ч (то есть, в 6 раз больше).

При управлении по критерию стабилизации заданной энергоэффективности отклонение температуры от заданного оптимального значения изменяет показатель энергоэффективности, что вызывает дополнительные издержки электроэнергии на единицу продукции. Для проведенных в диссертации экспериментов нормативный показатель энергоэффективности $K_{ЭФ}$ для оптимального режима резания составляет $8,61 \text{ кН} \cdot \text{мм}/\text{мм}^3$.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. Лютов, А. Г. Назначение режимов токарной обработки деталей газотурбинных двигателей по температуре в зоне резания / А. Г. Лютов, Г. Н. Коуров, Н. Г. Река // Вестник УГАТУ. – 2015. – №2. – С. 20-25.

2. Reka, N. G. Temperature control channel in the metal-cutting zone / N. G. Reka, G. N. Kourov, A. G. Lyutov // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 2. – pp. 163-167. (Original Russian Text published in STIN, 2015, No. 7, pp. 35-40).

3. Reka, N. G. Temperature measurement in the metal-cutting zone of a lathe/ N. G. Reka, G. N. Kourov, A. G. Lyutov // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 2. – pp. 159-162. (Original Russian Text published in STIN, 2015, No. 7, pp. 31-35).

Патенты

4. Способ определения температуры в зоне резания металла: пат. 2585917 Рос. Федерация: МПК В 23 В 25/06, В 23 Q 17/00 / Река Н. Г., Коуров Г. Н., Лютов А. Г.; патентообладатель Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – № 2014148819/02; заявл. 03.12.14; опубл. 10.06.16.

В других изданиях

5. Коурова, Н. Г. Динамическая модель процесса резания в системе автоматического управления температурой в зоне резания металла / Н.Г.

Коурова// Управление большими системами: материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 3 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 141 – 145.

6. Коурова, Н. Г. Проблемы идентификации силы резания металла при лезвийной обработке параметрами электрической машины / Н. Г. Коурова // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение: Сборник научных трудов Восьмой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. 19-20 февраля 2013 г. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 159–163.

7. Коурова, Н. Г. Проблемы создания системы автоматического регулирования температуры в зоне резания при лезвийной обработке металлов / Н. Г. Коурова // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2/ Уфимск. Гос. Авиац. Техн. Ун-т. – Уфа: УГАТУ. – 2013. – С.234-235.

8. Коурова, Н. Г. Расчет режимов резания труднообрабатываемых материалов, используемых в конструкции ГТД / Н. Г. Коурова, К. С. Провалов, В. М. Коленченко // V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов. Материалы конференции: Уфимск. моторостр. произв. объединен. – Уфа, УМПО, 2011. – С. 186-189.

9. Коурова, Н. Г. Система выбора режимов резания при механической обработке / Н. Г. Коурова, К. С. Провалов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С.136-138.

10. Лютов, А. Г. Определение температуры в зоне резания металла по энергетическим параметрам главного привода станка / А. Г. Лютов, Г. Н. Коуров, Н. Г. Коурова // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Уфимск. Гос. Авиац. Техн. Ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С.165-169.

11. Провалов, К. С. Оптимизация режимов механической обработки с учетом технологических ограничений / К. С. Провалов, Н. Г. Коурова // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды III международной научно-технической конференции (Резниковские чтения), Тольятти, 12-14 октября 2011г./ под ред. Л. А. Резникова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. – С.272-275.

12. Река, Н. Г. Динамическая модель преобразования момента двигателя в тангенциальную составляющую силы резания / Н. Г. Река // Актуальные проблемы науки и техники. Девятая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение. Естественные науки. Сборник науч. трудов/ Уфимск. гос. Авиац. Техн. Ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 178–182.

13. Река, Н. Г. К вопросу измерения тангенциальной составляющей силы резания при токарной обработке / Н. Г. Река // Мавлютовские чтения: Материалы

Всероссийской молодежной научной конференции: в 3 т. Т. 1 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2015. – С. 802 – 805.

14. Река, Н. Г. К вопросу определения энергоэффективности токарной обработки по модели процесса резания как объекта управления / Н. Г. Река // Мавлютовские чтения: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции: в 3 т. Т. 1 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2015. – С. 805 – 810.

15. Река, Н. Г. Модель измерителя выходной координаты системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла / Н. Г. Река, Г. Н. Коуров, А. Г. Лютов // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 20-21 апреля 2016 года / ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Ижевск, 2016. – С. 215-221.

Методические рекомендации

16. Коуров, Г. Н. Теория автоматического управления технологическими процессами: методические рекомендации к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления технологическими процессами» / Г. Н. Коуров, А. Г. Лютов, Н. Г. Река. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – 42 с.