

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

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)**

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

**Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Лютов А. Г.**

Уфа – 2016

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1. Аналитический обзор состояния вопросов управления и повышения эффективности процесса лезвийной обработки.....</b>	<b>17</b>
1.1 Эффективность процесса механической обработки металла.....	17
1.2 Существующие представления процесса резания.....	23
1.2.1 Энергетика процесса резания .....	23
1.2.2 Методы контроля температуры в зоне резания и применимость их в системах управления .....	28
1.3 Задачи исследований .....	30
Выводы по главе 1 .....	31
<b>Глава 2. Гипотеза о связи температуры в зоне резания металла с расходом электроэнергии привода главного движения станка .....</b>	<b>32</b>
2.1 Установление связи температуры в зоне резания с расходом электроэнергии привода главного движения на процесс резания .....	32
2.1.1 Количество тепла, поступающего в зону резания .....	32
2.1.2 Существующие понятия о температуре в зоне резания.....	33
2.1.3 Связь температуры в зоне резания с мощностью электрической машины привода главного движения.....	35
2.2 Определение температуры в зоне резания по расходу энергии на процесс резания .....	38
2.2.1 Существующая модель зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания .....	38
2.2.2 Предлагаемый подход к решению проблемы определения температуры в зоне резания металла .....	40
2.2.2.1 Гипотеза о «нагреваемом теле».....	40
2.2.2.2 Нагрев «нагреваемого тела».....	43
2.2.2.3 Методика проверки гипотезы о «нагреваемом теле» .....	44

2.2.2.4 Анализ результатов сравнения теоретической и экспериментальной масс нагреваемого тела, подтверждение гипотезы .....	49
Выводы по главе 2 .....	50
<b>Глава 3. Процесс резания металла и технологическое оборудование как объекты управления .....</b>	<b>51</b>
3.1 Силовая часть канала управления температурой в зоне резания .....	51
3.1.1 Схема силовой части канала управления температурой в зоне резания .....	51
3.1.2 Методика анализа элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания как объектов управления .....	52
3.1.3 Этапы анализа процесса резания как объекта управления .....	55
3.1.4 Принятие решения о типе системы автоматического управления, которая может реализовать цель управления объектом .....	56
3.2 Анализ процесса резания как объекта управления .....	58
3.3 Система «электродвигатель привода главного движения – станок» как объект управления .....	63
3.3.1 Возмущающие воздействия электродвигателя .....	64
3.3.2 Механизм преобразования скорости вращения двигателя привода главного движения в скорость резания .....	65
3.4 Преобразователь электрической энергии как объект управления .....	68
3.5 Модель тангенциальной составляющей силы резания .....	70
3.5.1 Тангенциальная составляющая силы резания .....	70
3.6 Функциональная схема силовой части канала управления температурой резания как объекта управления .....	72
3.7 Структурная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания .....	72
3.8 Канал управления подачей .....	73
3.8.1 Математическое описание динамических свойств электромеханического преобразователя механизма подачи .....	73

3.8.2 Модель момента сопротивления нагрузки двигателя механизма подачи .....	77
Выводы по главе 3 .....	80
<b>Глава 4. Система автоматического регулирования температуры в зоне резания металла.....</b>	<b>81</b>
4.1 Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла .....	81
4.2 Компенсация действия возмущений преобразователя энергии привода главного движения .....	81
4.3 Компенсация возмущений, действующих на систему «электродвигатель привода главного движения – станок» .....	83
4.4 Компенсация возмущений, действующих на канал управления подачей .....	85
4.5 Измеритель тангенциальной составляющей силы резания .....	86
4.6 Компенсация возмущений, действующих на процесс резания.....	89
4.7 Анализ точности регулирования температуры в зоне резания .....	91
4.8 Модель измерителя температуры в зоне резания.....	95
4.9 Структурная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла .....	98
Выводы по главе 4 .....	99
<b>Глава 5. Экспериментальные исследования системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла.....</b>	<b>100</b>
5.1 Технические характеристики оборудования, используемого в модели системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла .....	100
5.1.1 Технические характеристики токарного станка .....	100
5.1.2 Технические характеристики привода главного движения токарного станка .....	102
5.1.3 Технические характеристики привода подачи.....	105

5.2 Исследование характеристик звеньев структурной схемы системы автоматического регулирования температуры в зоне резания .....	106
5.2.1 Исследование характеристик процесса резания при торцовом точении .....	106
5.2.1.1 Модель процесса резания .....	106
5.2.1.2 Статические характеристики процесса резания .....	108
5.2.1.3 Динамические характеристики процесса резания.....	111
5.2.1.4 Особенности регулировочных характеристик процесса резания .....	115
5.2.1.5 Об энергоэффективности процесса лезвийной обработки.....	119
5.2.2 Исследование характеристик системы «электропривод главного движения – станок» .....	121
5.2.2.1 Исследование характеристик станка .....	121
5.2.2.2 Исследование характеристик электропривода механизма главного движения станка .....	124
5.2.2.3 Параметры схемы замещения асинхронного двигателя.....	125
5.2.2.4 Исследование характеристик электропривода главного движения станка при действии возмущений .....	128
5.2.3 Исследование характеристик электропривода механизма подачи	132
5.2.4 Исследование взаимодействия процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок» .....	137
5.3 Исследование характеристик модели измерителя температуры в зоне резания.....	141
5.4 Исследование статических и динамических характеристик системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла.....	141
5.5 Исследование действия возмущений на выходную координату без применения системы автоматического регулирования температуры в зоне резания.....	144

5.6 Сравнительная оценка эффективности процесса лезвийной обработки металлов с применением и без применения САРТ.....	145
Выводы по главе 5 .....	151
<b>Основные выводы и результаты .....</b>	<b>153</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>156</b>
<b>Приложение А. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла .....</b>	<b>170</b>
<b>Приложение Б. Патенты, акты внедрения, дипломы.....</b>	<b>171</b>

## Введение

### **Актуальность темы исследования**

За прошедшие 100 с лишним лет проблемы, связанные с обработкой металлов резанием, не потеряли актуальности, а скорее – возросли [74]. Доля механообработки по трудоемкости при изготовлении деталей авиадвигателей составляет от 40 до 60 процентов от общего времени изготовления этих изделий [20].

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, посвящённые вопросам автоматизации технологических процессов лезвийной обработки. К ним относятся труды ученых: Абакумова А. М., Видманова Ю. И., Михелькевича В. Н. [1]; Гозмана Я. Б., Пиковского Ю. Д. [11]; Зориктуева В. Ц. [17, 18, 19]; Силина С. С. [67, 68]; Подураева В. Н. [52]; Соломенцева Ю. М. [73, 90]; Тверского М. М. [89]; Исаева Ш. Г. [23]; Лютова А. Г. [38, 41]; Никина А. Д. [47], Месягутова И. Ф. [44]; Григорьева С. Н., Терешина М. В., Кулагина О. А. [16, 92]; Карпова А. В. [25, 26]; Зубкова В. А. [22] 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. Основоположником 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. [42], Резников А. Н. [60], Бобров В. Ф. [8], Лоладзе Т. Н. [37], Безъязычный В. Ф. [5, 6], Грановский Г. И. [15], Старков В. К. [84, 85, 86, 87] и другие.

Теме исследований, выполняемых в диссертации, посвящен ряд современных научных трудов отечественных ученых: Адаменко В. М., Мрочек Ж. А. [2]; Лазуткиной Н. А. [36]; Мухина В. С. [45, 46]; Смылова А. М. [69, 70, 71]; Постнова В. В. [54, 55]; Юрьева В. Л. [56, 98]; Кишурова В. М., Черникова П. П. [28]; Таратынова О. В. [88]; Бесекерского В. А., Попова Е. П. [7]; Башарина А. В., Новикова В. А., Соколовского Г. Г. [4]; Фираго Б. И., Павлячика Л. Б. [95]; Плотникова А. Л. [50], Жучкова Н. С. [51] Курченко А. И. [35], Солодкова В. А. [72] и других.

Исследованиям процесса резания металла и его автоматизации также посвящены научные труды зарубежных ученых: М. Н. Dirikolu [99]; В. А. Halil [100]; I. Lazoglu, Y. Altintas [101]; X. Luo, K. Cheng, R. Holt, X. Liu [102]; Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan [108], T. Özel [103, 104, 105] и других.

В базе данных Роспатента имеются заявки на изобретения, патенты, посвященные вопросам измерения температуры в зоне резания [75, 77, 78, 81, 94], определению эффективных режимов токарной обработки [82], стабилизации процесса резания на токарном оборудовании [76, 79] 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 при помощи измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) по модели, предложенной в п. 1.

### **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.) (приложение Б).

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.

### **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 [32, 33, 58] установлена и доказана эффективность применения математических моделей процесса резания при управлении режимами лезвийной обработки;

- в работах [29, 31, 40] 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 работах [63, 107] 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 [80] представлен способ определения температуры в зоне резания металла по расходу электроэнергии привода главного движения на процесс резания;

- в работах [39, 61, 106] 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 [66] разработана модель измерителя температуры в зоне резания, использованная при создании системы автоматического регулирования температуры в зоне резания;

- в работах [30, 62, 64] 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 [65] 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.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – [29, 32, 33, 58]; по главе 2 – [39, 40, 63, 80, 107]; по главе 3 – [30, 31, 61, 62, 106]; по главе 4 – [64, 66]; по главе

5 – [65]. Шесть работ написаны автором единолично, другие совместно с научным руководителем или другими членами научного коллектива.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы приняты к использованию (приложение Б) 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 175 страниц машинописного текста, библиографический список из 108 наименований, 2 приложения.

## **Глава 1. Аналитический обзор состояния вопросов управления и повышения эффективности процесса лезвийной обработки**

### **1.1 Эффективность процесса механической обработки металла**

На международном инвестиционном форуме «Сочи-2015» определено, что одним из показателей экономического роста страны является повышение эффективности производства. Повышение эффективности производства заключается в сокращении издержек при изготовлении изделий. При механообработке на токарных станках повышение эффективности процесса резания реализуется за счет сокращения издержек на изготовление деталей.

Издержки – это выраженные в денежной форме затраты, обусловленные расходом разных видов экономических ресурсов (сырья, материалов, труда, основных средств, услуг, финансовых ресурсов) в процессе производства и обращения продукции, товаров [59].

Повышение эффективности процесса механообработки на токарных станках достигается за счет устранения избыточных издержек (относительно нормативных) на производство деталей.

Избыточные издержки механической обработки на токарных станках могут быть обусловлены следующим:

- невозможностью стабильно получать высокие показатели качества поверхности детали (остаточные напряжения, глубину и степень наклепа, параметры шероховатости), так как канал управления температурой подвержен действию широкого спектра возмущений, а существующие средства контроля температуры в зоне резания в производственных условиях невозможно использовать вследствие сложности их применения, что вызывает возможность получения брака изделия;

- избыточными затратами времени на переналадку инструмента;

- избыточным расходом дорогостоящих инструментальных материалов;

- назначением заниженных режимов резания с целью предотвращения перегрева инструмента и выхода из строя оборудования;
- избыточным расходом энергии на единицу продукции;
- и другим.

Сокращение издержек может быть достигнуто за счет управления режимами резания по следующим критериям эффективности.

#### 1. Критерий поддержания оптимальной температуры.

В зоне резания металлов вследствие пластических деформаций и трения возникает теплота, которая оказывает влияние на коэффициент трения, характер наростообразования, износ инструмента, качество обработанной поверхности, энергопотребление и другие показатели процесса резания. Особенно важно соблюдение температурно-силовых режимов при обработке жаропрочных материалов, использующихся для изготовления ответственных деталей газотурбинных двигателей [17]. Поэтому для правильного выбора условий и режимов обработки необходимо знать закономерности изменения температуры в зоне резания в зависимости от влияющих на нее факторов.

Для ответственных деталей машин необходимо обеспечить требуемые эксплуатационные свойства, которые зависят от одного или нескольких параметров. Эксплуатационные свойства определяются как параметрами точности деталей, так и качеством их поверхностного слоя (шероховатостью, степенью и глубиной наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений) [8].

В реальных условиях производства деталей, даже при стабильном задании управляющих воздействий системой ЧПУ, параметры процесса резания могут отклоняться в результате действия возмущений, вызывающих отклонение показателей качества обрабатываемой поверхности.

На основании этого можно сделать вывод, что эффективность процесса резания повышается за счет стабилизации основных показателей качества обрабатываемой поверхности детали – остаточных напряжений, глубины и степени наклепа, параметров шероховатости и погрешности обработки, с учетом

одновременного действия механических и тепловых явлений при резании материалов. Для этого необходимо осуществлять оптимальное управление процессом резания.

А. Д. Макаровым в [42] сформулировано положение, в котором констатируется, что для заданного материала режущей части инструмента при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания соответствует постоянная температура в зоне резания – оптимальная температура резания. Режимы резания, соответствующие оптимальной температуре, называют оптимальными режимами резания. Установление оптимальных режимов резания позволяет производить эффективное резание со стабилизацией качества поверхностного слоя детали. При оптимальной температуре резания также снижается интенсивность износа инструмента, что повышает производительность оборудования за счет уменьшения количества перенастроек инструмента. Во многих случаях, особенно для труднообрабатываемых материалов, оптимальные режимы резания с достаточной точностью могут быть приняты в качестве экономических и энергосберегающих.

Наименьшая интенсивность износа инструмента и наивысшее качество обработанной поверхности могут быть получены, если соблюдается постоянство оптимальной температуры резания при формообразовании всей поверхности детали.

Таким образом, сокращение издержек, то есть повышение эффективности механической обработки при назначении режимов, работающих по критерию поддержания оптимальной температуры осуществляется за счет экономии дорогостоящих инструментальных материалов, сокращения числа переналадок, за счет повышения качества изделия (стабилизируются шероховатость поверхности, степень и глубина наклепа, остаточные напряжения и др.).

2. Критерий достижения максимальной производительности (форсированные режимы резания, высокоскоростная обработка (ВСО)).

Повышение производительности оборудования всегда является актуальным. В некоторых случаях, исходя из экономических соображений, стремятся повысить производительность процесса резания до максимального значения. При этом назначаются форсированные режимы, обеспечивающие процесс резания по критерию максимальной производительности.

Ограничивающим фактором при форсировании режимов является температура в зоне резания [60]. При высокой температуре может произойти перегрев инструмента. Форсирование режимов можно осуществить только при непрерывном контроле температуры в процессе механической обработки. Однако, для контроля температуры в зоне резания в производственных условиях нет достаточно простых, надёжных, точных измерителей температуры в зоне резания металла.

При изготовлении деталей пользуются технологическими рекомендациями, на основании которых назначают режимы резания. Все рекомендации имеют заниженные режимы по нескольким причинам: опасности перегрева инструмента, выхода из строя технологического оборудования, отсутствия непрерывного контроля над тепловыми процессами в зоне резания. Непрерывный контроль температуры позволяет управлять режимами резания, добиваясь максимальной производительности.

Зная свойства обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры инструмента, размеры обрабатываемой детали, параметры оборудования, можно создать модель процесса резания, которая позволяет определить температуру в зоне резания и в соответствии с этим назначить режимы обработки, позволяющие добиться максимальной производительности. [32, 33, 58].

Однако в ручном режиме оператор не сможет добиться надлежащего качества регулирования процесса резания, даже при наличии надёжного измерителя температуры, поэтому необходимо применение системы автоматического регулирования температурой в зоне резания.

### 3. Критерий стабилизации заданной энергоэффективности.

В настоящее время уделяется большое внимание вопросам исследования энергоэффективности существующих и проектируемых технологических процессов и оборудования, а также выработке мероприятий по ее повышению.

Президентом Российской Федерации энергосбережение отнесено к стратегическим задачам государства.

«Главная задача сегодня – экономить на издержках», – делится соображениями по теме директор Фонда национальной энергобезопасности Константин Симонов [53].

Для преодоления барьеров, сдерживающих развитие энергоэффективности и энергосбережения в Российской Федерации, принят ряд федеральных законов, в частности Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Указ Президента РФ, постановления Правительства РФ содержат требования и нормы, направленные на повышение энергоэффективности российской экономики.

Актуальность вопроса энергоресурсосбережения подтверждается многочисленными научно-техническими выставками, конференциями, форумами, посвященными энергоресурсосбережению в различных отраслях. Например, на сайте [49] представлен план выставок по энергоресурсосбережению на 2015 год, предусматривающий проведение 29 выставок.

Для оценки энергоэффективности оборудования выпущен ГОСТ 54430-2011 [14] «Оборудование металлообрабатывающее и деревообрабатывающее. Показатели энергоэффективности. Номенклатура. Методы определения и нормирования значений». В п. 5.1 которого говорится, что основной показатель энергоэффективности – есть удельный расход электроэнергии  $\mathcal{E}_y$ , т.е. отношение затрачиваемой оборудованием электроэнергии к объему продукции, произведенной за это же время при определенных условиях.

Комплексными теоретическими исследованиями [8] Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева установлено, что заданному комплексу показателей качества поверхностного слоя соответствует некоторая определенная величина энергетического критерия  $A$ :

$$A = \frac{a \cdot b \cdot (c\rho)_d \cdot \theta}{P_z}, \quad (1.1)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно толщина и ширина среза в процессе обработки;

$(c\rho)_d$  – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала;

$\theta$  – температура в зоне резания;

$P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания.

Согласно уравнению (1.1), энергетический критерий  $A$  является функцией температуры в зоне резания. В то же время энергетический критерий определяет отношение объема срезанной стружки к энергии, затраченной на ее срезание. Это отношение является обратной величиной показателя энергоэффективности, приведенного в ГОСТ [14].

То есть показатель энергоэффективности зависит от температуры в зоне резания.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что эффективность процесса механической обработки металла может быть повышена при управлении режимами резания по 1, 2, 3 критериям эффективности. Реализация таких способов управления возможна при автоматическом регулировании температуры в зоне резания. Однако для САРТ нужна простая, надежная и точная система измерения температуры.

## 1.2 Существующие представления процесса резания

### 1.2.1 Энергетика процесса резания

Для успешного решения задачи повышения эффективности процесса механической обработки за счет управления температурой в зоне резания по энергетическим параметрам главного привода токарного станка в первую очередь необходимо изучить существующие представления о физических основах процесса резания.

Энергетика процесса резания и распространение тепла в зоне резания наиболее полно рассмотрены в работах [8, 15, 28, 60].

Почти вся механическая работа, затраченная на пластическую деформацию и разрушение металла в процессе стружкообразования, составляет источник выделения теплоты  $Q_1$ . Область генерирования этой теплоты – плоскость скалывания  $1-2-3-4$ , то есть зона наибольших пластических деформаций (рисунок 1.1, а) [15].

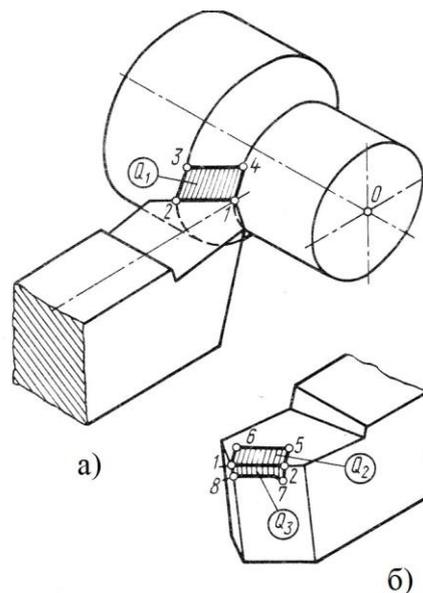


Рисунок 1.1 – Области генерирования теплоты  $Q_1$  – в плоскости скалывания  $1-2-3-4$ ;  $Q_2$  – на передней поверхности лезвия  $1-2-5-6$ ;  $Q_3$  – на задней поверхности лезвия  $1-2-7-8$

Работа сил трения на передней поверхности лезвия резца является источником выделения теплоты  $Q_2$ . Область генерирования этой теплоты – контактирующие друг с другом прирезцовая поверхность стружки и передняя поверхность лезвия инструмента 1-2-5-6 (рисунок 1.1, б).

Работа сил трения по задней поверхности лезвия инструмента является источником теплоты  $Q_3$ , выделяющейся при резании. Область генерирования этой теплоты – задняя поверхность лезвия резца, находящаяся в контакте с поверхностью резания, ограниченная контуром 1-2-7-8 (рисунок 1.1, б).

Работа, затраченная на пластическую деформацию металла перед плоскостью скалывания, является источником теплоты  $Q_4$ . Область генерирования этой теплоты – объем металла, прилегающий к плоскости скалывания 1-2-3-4 (рисунок 1.2) [15].

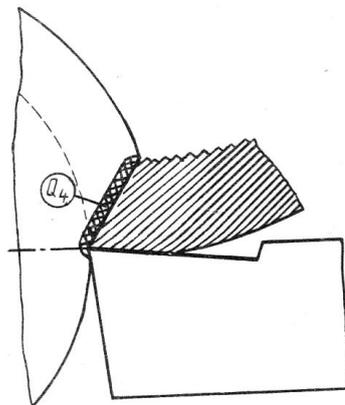


Рисунок 1.2 – Область генерирования теплоты  $Q_4$  впереди плоскости скалывания

Большая часть выделяющейся в плоскости 1-2-3-4 теплоты  $Q_1$  и часть выделяющейся в плоскости 1-2-5-6 теплоты  $Q_2$  идет на нагрев стружки и уносится ею из зоны резания. Эта часть отводимой теплоты  $q_1$ , (рисунок 1.3) [15].

Часть выделяющейся в плоскости 1-2-5-6 теплоты  $Q_2$  и часть выделяющейся в плоскости 1-2-7-8 теплоты  $Q_3$  нагревают материал режущей части резца и постепенно распространяются по всей массе его корпуса. Материал резца является проводником потока отводимой теплоты  $q_2$ , (рисунок 1.3).

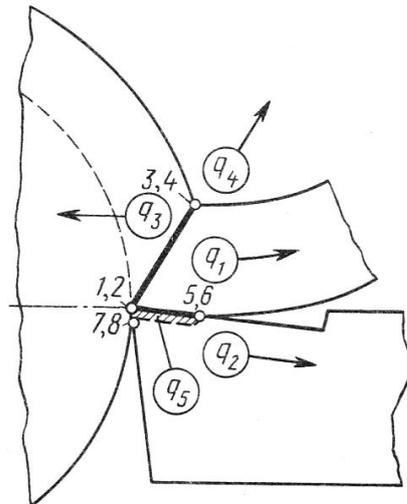


Рисунок 1.3 – Схема отвода теплоты из зоны резания:  $q_1$  – в стружку;  $q_2$  – в инструмент;  $q_3$  – в обрабатываемую заготовку;  $q_4$  – в окружающую среду;  $q_5$  – накопление теплоты в приграничном слое лезвия

Часть выделяющейся в плоскости 1-2-3-4 теплоты  $Q_1$ , некоторая часть  $Q_4$  и часть выделяющейся в плоскости 1-2-7-8 теплоты  $Q_3$  проникают в материал обрабатываемой заготовки и нагревают ее. Эта отводимая теплота обозначена  $q_3$  (рисунок 1.3).

Часть общего количества выделяющейся теплоты отводится из зоны резания в окружающую среду. При резании всухую эта теплота  $q_4$  (рисунок 1.3) отводится в окружающую воздушную среду излучением. Если работа ведется с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), то кроме излучения часть теплоты  $q_4$  отводится за счет нагрева и парообразования СОЖ [15, 28].

Часть выделившейся в плоскостях 1-2-5-6 и 1-2-7-8 теплоты накапливается в тонком приграничном слое материала инструмента, контактных площадках, прилегающем к передней и задней плоскостям инструмента. Эта часть теплоты  $q_5$  вызывает повышение температуры на режущем лезвии (рисунок 1.3).

Таким образом, существующее представление о тепловом балансе процесса резания может быть представлено в виде уравнения (1.2) [15]. То есть количество теплоты, выделяющейся в зоне резания равно количеству теплоты, удаляемой из нее за тот же промежуток времени:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5. \quad (1.2)$$

Однако соотношение слагаемых уравнения теплового баланса (1.2) в процессе резания не является постоянным и изменяется в зависимости от скорости резания  $v$  (рисунок 1.4) [15].

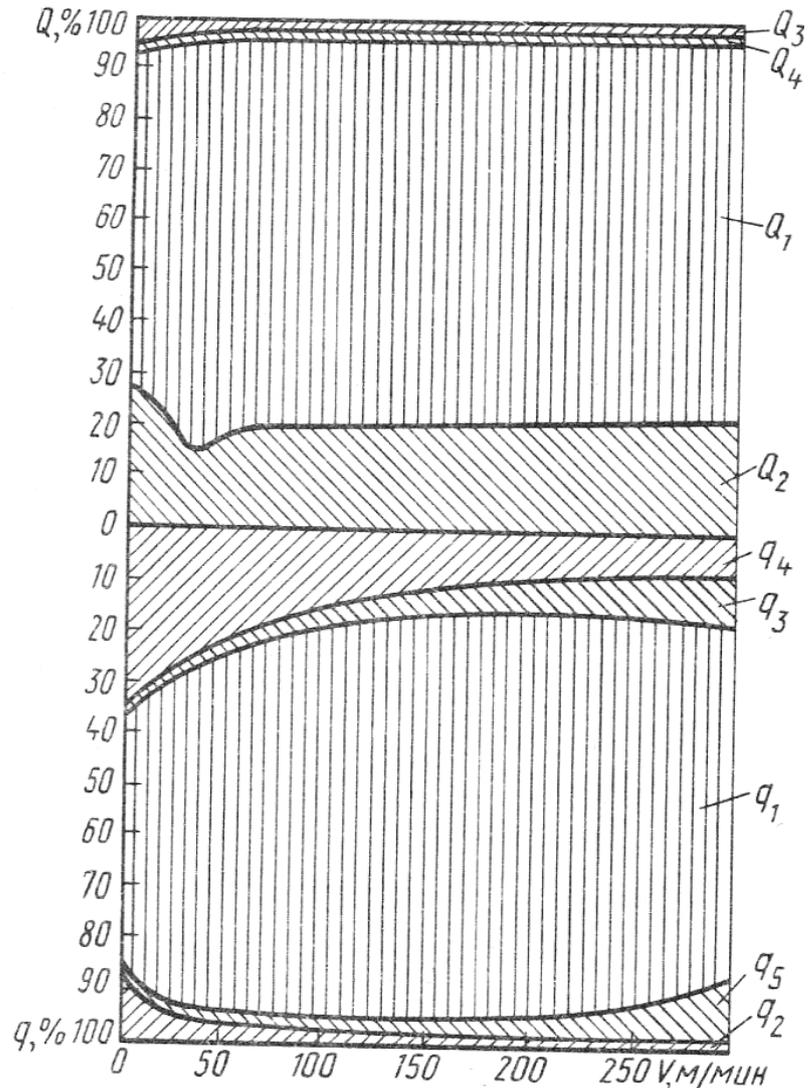


Рисунок 1.4 – Зависимость соотношения слагаемых теплового баланса от скорости резания

Приведенный на рисунке 1.4 скоростной интервал можно разделить на три условных участка [15]:

а) участок пониженных режимов резания ( $v < 100$  м/мин);

б) участок рекомендуемых режимов резания ( $v = 100 \dots 200$  м/мин);

в) участок повышенных режимов резания ( $v > 200$  м/мин).

Во всех трех скоростных диапазонах теплота  $Q_1$  составляет 75...80% всей приходной части баланса.

$Q_2$  составляет 19...22,5% (второй по значимости источник тепловыделений, доля которого с увеличением скорости резания возрастает).

$Q_3$  составляет 3,5...2% общего количества генерируемой теплоты и с увеличением скорости резания уменьшается.

Удельное значение теплоты  $Q_4$  во всех скоростных зонах практически остается постоянным и составляет 0,5%.

Самой большой составляющей расходной части теплового баланса является  $q_1$ , то есть основное количество теплоты уносит с собой из зоны стружкообразования срезаемая стружка (составляет 68...77%). Наибольшее удельное значение уносимая стружкой теплота  $q_1$  имеет в диапазоне рекомендуемых рабочих скоростей резания.

Доля теплоты  $q_2$ , отводимой в тело резца, составляет незначительную часть расходной части баланса, уменьшающуюся с увеличением скорости резания (составляет 5...2% всего отводимого из зоны стружкообразования количества теплоты).

$q_3$ , выражающая количество теплоты, отводимой в тело заготовки, возрастает с увеличением скорости резания (2...8% общего количества отводимой теплоты).

Теплота  $q_4$ , отводимая в окружающую среду, занимает относительно остальных составляющих второе место в расходной части баланса, но ее значимость уменьшается с возрастанием скорости резания (24...9%).

Как абсолютное, так и относительное количество аккумулируемой в теле резца теплоты  $q_5$  невелико и возрастает с ростом скорости резания от 1% до 6%. Но оно играет существенную роль на значение температуры на режущих кромках инструмента.

Таким образом, при резании конструкционных материалов большая часть работы резания переходит в тепло. Образовавшееся тепло характеризует среднюю температуру в зоне резания, оно распространяется из очагов теплообразования к более холодным областям.

При необходимости знать температуру конкретной области зоны резания, определяют энергию, расходуемую на резание, и пользуясь законами распределения тепла в зоне резания (например, с помощью системы точечных мгновенных источников тепла [8]), определяют температуру в конкретной области, например, в зоне контакта «инструмент-деталь-стружка».

### **1.2.2 Методы контроля температуры в зоне резания и применимость их в системах управления**

Согласно параграфу 1.1 данной работы, для качественного управления процессом резания и повышения эффективности процесса механической обработки необходимо создать САРТ. В настоящее время основной проблемой при создании САРТ является отсутствие надежного и простого способа измерения температуры в процессе резания металла при формообразовании поверхности детали, не требующего изменения конструкции оборудования.

Для определения температуры резания в настоящее время существуют следующие методы, которые можно разделить на несколько групп по критерию применимости в САРТ.

К первой группе относятся методы, в которых измеряется средняя температура стружки, либо определенных участков изделия или резца [74, 28]: калориметрический метод; метод цветов побежалости; метод термокрасок, способ бесконтактного определения температуры в зоне резания при механической обработке [75].

Второй группе принадлежат методы, заключающиеся в измерении температуры узкоограниченных участков зоны резания или резца, например [74, 28], метод термопар, оптический, радиационный методы.

К третьей группе можно отнести аналитические методы, дающие информацию о температуре в зоне резания по модели связи температуры резания с параметрами процесса резания [29, 42, 60, 68, 88].

К четвертой группе можно отнести методы, получающие информацию о температуре непосредственно из зоны резания металла, например, по величине ЭДС естественной термопары «резец – деталь» [17], по температуре контактного взаимодействия при трении и резании [81].

Методы, представленные в первой группе, не могут быть использованы в САРТ, так как измерение происходит вне зоны резания.

Вторая группа методов требует использования достаточно сложной аппаратуры, при этом измеряется температура узкоограниченных участков зоны резания или резца.

С помощью методов третьей группы можно осуществлять измерение температуры в зоне резания по параметрам процесса резания, однако, существующие модели, работают в узком диапазоне изменения параметров резания [88]. Кроме того, модели являются, как правило, приближенными из-за ряда допущений [28].

Наиболее предпочтительным из существующих методов измерения температуры, пригодных для создания САРТ, является метод измерения температуры по термо-электродвижущей силе (термо-ЭДС, ТЭДС), относящийся к четвертой группе. Однако, проблемным в этом способе является необходимость конструктивной доработки оборудования, имеют место погрешности измерения температуры резания, которые связаны в основном со следующими факторами: влиянием паразитных ТЭДС (составляют 10...30% от величины полезного сигнала); шунтирующим действием стружки на контакт инструмента и детали (составляет от 2 до 14 % уровня полезного сигнала); разбросом значений

удельных дифференциальных ТЭДС режущих пластин и заготовки (составляет от 10 до 50 % полезного сигнала) [21]. Кроме того, тарирование термопары осуществляется вне зоны резания, поэтому соответствие фактического значения температуры в зоне резания и показаний термопары, является проблематичным.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод, что все известные методы контроля температуры в зоне резания имеют недостатки, не позволяющие построить САРТ, пригодную для эксплуатации в производственных условиях. Таким образом, до настоящего времени проблема измерения температуры в зоне резания является актуальной. Для создания САРТ в зоне резания и широкого промышленного применения необходим простой и надежный способ измерения температуры в зоне резания.

### **1.3 Задачи исследований**

На основе анализа проблем, решаемых в диссертации, ставятся следующие задачи исследований.

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.

## Выводы по главе 1

1. Определен способ повышения эффективности процесса лезвийной обработки металлов, основанный на управлении температурой в зоне резания.

2. Произведен анализ существующих представлений процесса резания. Изучена энергетика процесса резания. В существующих представлениях процесса резания не установлена физическая связь между температурой в зоне резания с расходом электроэнергии привода главного движения токарного станка.

3. Исследованы существующие методы контроля температуры в зоне резания металла. Предложена классификация методов контроля температуры в зоне резания по критерию применимости в САРТ. Все известные методы имеют недостатки, не позволяющие построить САРТ, пригодную для эксплуатации в производственных условиях. Таким образом, до настоящего времени проблемы измерения температуры в зоне резания и создания САРТ являются актуальными.

## **Глава 2. Гипотеза о связи температуры в зоне резания металла с расходом электроэнергии привода главного движения станка**

### **2.1 Установление связи температуры в зоне резания с расходом электроэнергии привода главного движения на процесс резания**

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в использовании аналитических методов для изучения тепловых явлений в зоне деформации и на контактных поверхностях инструмента, и значительное количество экспериментальных работ, основными объектами изучения которых являются: а) количество выделяемого при резании тепла и его распределение между стружкой, деталью и инструментом; б) температура, устанавливающаяся на контактных поверхностях инструмента; в) температурные поля в зоне деформации и режущем клине инструмента, работы в этом направлении продолжаются [8]. В связи с этим проводятся исследования по изучению количества тепла, поступающего в зону резания.

#### **2.1.1 Количество тепла, поступающего в зону резания**

Опыты, проведенные рядом советских ученых, в том числе акад. П. Л. Ребиндером совместно с Г. И. Епифановым, С. С. Можаяевым и др. приводят к заключению, что в теплоту переходит практически вся (более 99,5%) работа резания [8].

Если обозначить механическую энергию (работу резания), затрачиваемую на процесс резания  $Q_M$ , тепловую энергию, нагревающую массу деформируемой в процессе резания части заготовки, переходящей в стружку –  $Q_n$ , тепловую энергию, отводимую из зоны резания –  $Q_{из}$ , то взаимосвязь между ними можно описать в виде уравнения (2.1). Это уравнение представляет собой закон сохранения энергии:

$$Q_M = Q_n + Q_u \quad (2.1)$$

Таким образом, если работа резания или любая ее составляющая  $E$  выражена в Дж, то соответствующее им количество выделяемого тепла:  $Q = (T_{\text{ЭР}} \cdot E)$  кал, где  $T_{\text{ЭР}}=0,239$  кал/Дж – тепловой эквивалент работы [9].

Мгновенное значение механической энергии, затрачиваемой на процесс резания определяется по выражению:

$$Q_M = P_{\text{рез}} \cdot d\tau, \quad (2.2)$$

где  $P_{\text{рез}}$  – механическая мощность, совершающая процесс резания;

$\tau$  – текущее время.

### 2.1.2 Существующие понятия о температуре в зоне резания

Под температурой резания  $\theta$ , понимают [74] среднюю температуру на поверхности контакта инструмента со стружкой и поверхностью резания.

Если через  $\theta_{\text{П.СР}}$ , и  $\theta_{\text{З.СР}}$ , обозначить средние температуры на площадках контакта передней и задней поверхностей, то температура резания определяется выражением [74]:

$$\theta = \frac{\theta_{\text{П.СР}} \cdot C_1 + \theta_{\text{З.СР}} \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad (2.3)$$

где  $C_1$  – ширина площадки контакта между стружкой и инструментом;

$C_2$  – ширина площадки контакта между поверхностью резания и инструментом.

Температуру резания иногда называют средней температурой контакта [74].

Для незатупленного инструмента шириной  $C_2$  площадки контакта задней поверхности с поверхностью резания можно пренебречь, а поэтому температуру резания можно считать равной средней температуре на площадке контакта стружки с передней поверхностью, т. е.  $\theta = \theta_{\text{П.СР}}$ . Передняя поверхность

инструмента нагревается за счет тепла деформации и трения на передней поверхности инструмента. Тепло трения на задней поверхности инструмента возникает по мере износа инструмента. Поэтому температура резания равна сумме двух температур: температуры деформации  $\theta_d$ , и средней температуры трения на передней поверхности инструмента  $\theta_{п.ср}$  [74]:

$$\theta = \theta_d + \theta_{п.ср}. \quad (2.4)$$

Температура резания зависит от мощности тепловых источников в зоне деформации и на передней поверхности инструмента, а также интенсивности отвода тепла в деталь, инструмент и СОЖ. При резании определенного материала температура резания растет с увеличением скорости резания и размеров срезаемого слоя. Однако их влияние на температуру резания неодинаково. На основании экспериментальных данных [74] получена формула, связывающая температуру резания с толщиной, шириной срезаемого слоя и скоростью резания при работе различными инструментами:

$$\theta = C_\theta \cdot v^{x_5} \cdot a^{y_5} \cdot b^{z_5}, \quad (2.5)$$

где  $C_\theta$  – коэффициент, зависящий от механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента и применяемой СОЖ;

$x_5, y_5, z_5$  – показатели степени при  $v, a, b$  соответственно при определении температуры в зоне резания, выбираются из справочников.

При любых видах обработки величины показателей неодинаковы:  $x_5 > y_5 > z_5$ , т. е. на температуру резания наибольшее влияние оказывает скорость резания, затем толщина  $a$  срезаемого слоя и наименьшее — ширина  $b$  срезаемого слоя.

Выражая физические размеры срезаемого слоя  $a$  и  $b$  при точении в формуле (2.5) через глубину резания  $t$ , подачу  $s$  и главный угол в плане  $\varphi_p$ , получим зависимость температуры в зоне резания от параметров процесса резания [74]:

$$\theta = C_\theta \cdot v^{x_5} \cdot s^{y_5} \cdot t^{z_5} \cdot (\sin \varphi_p)^{y_5 - z_5}. \quad (2.6)$$

Таким образом, в существующей литературе установлена связь

температуры резания с параметрами процесса резания и механическими свойствами обрабатываемого материала, которая описывается степенным эмпирическим уравнением (2.6).

### 2.1.3 Связь температуры в зоне резания с мощностью электрической машины привода главного движения

Мощность, затрачиваемая на резание, зависит от сил  $P_Z$  и  $P_X$ . В направлении силы  $P_Y$  (при отсутствии вибрации) движение не совершается, а поэтому работа ею не совершается. Работа силы  $P_X$  незначительна ввиду малой величины подачи. Поэтому мощность, затрачиваемая на резание, определяется только по силе  $P_Z$  [28].

Учитывая, что процесс резания осуществляется электрической машиной, а электрическая машина является преобразователем электрической энергии в механическую, то механическую мощность, затрачиваемую на процесс резания  $P_{рез}$  можно определить по эквивалентной электрической мощности машины, потребляемой из сети [40].

1. Для электропривода главного движения с асинхронным трехфазным двигателем полезная мощность представляется выражением:

$$P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi, \quad (2.7)$$

где  $P$  – полезная мощность двигателя, потребляемая из сети и передаваемая в нагрузку;

$U_{\phi}$  – фазное напряжение двигателя;

$I_{\phi}$  – ток фазы двигателя;

$\eta$  – КПД двигателя;

$\cos \varphi$  – отношение активной мощности к потребляемой.

Напряжение  $U_\phi$  и ток  $I_\phi$  могут быть определены с помощью штатных приборов, имеющихся на технологическом оборудовании, для определения величины  $\cos\varphi$  также имеются измерительные приборы.

Энергия, расходуемая на процесс резания, может быть определена по показаниям счетчика электроэнергии.

Полезная мощность двигателя  $P$ , обеспечивает выполнение процесса резания, а также расходуется на движение механизмов оборудования:

$$P = P_{\text{ХХ}} + P_{\text{Д}} + P_{\text{П}} + P_{\text{ТЗ}}, \quad (2.8)$$

где  $P_{\text{ХХ}}$  – мощность холостого хода;

$P_{\text{Д}}$  – мощность, расходуемая на деформацию на условной плоскости сдвига;

$P_{\text{П}}$  – мощность, расходуемая на преодоление трения на передней поверхности инструмента;

$P_{\text{ТЗ}}$  – мощность, расходуемая на преодоление трения на задней поверхности инструмента.

Очевидно, что мощность, расходуемая на выполнение процесса резания равна:

$$P_{\text{рез}} = P - P_{\text{ХХ}} = P_{\text{Д}} + P_{\text{П}} + P_{\text{ТЗ}}. \quad (2.9)$$

Таким образом, механическая энергия, затрачиваемая на процесс резания, в любой момент времени определяется по выражению (2.2), при этом механическая мощность, расходуемая на выполнение процесса резания, может быть определена по эквивалентной мощности электрической машины, потребляемой из сети, за вычетом мощности холостого хода.

Для установления связи температуры в зоне резания с количеством тепловой энергии, поступающей в зону резания, уравнение закона сохранения энергии (2.1) может быть представлено в следующем виде:

$$P_{\text{рез}} \cdot d\tau = c \cdot m \cdot d\lambda + F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau, \quad (2.10)$$

где  $P_{\text{рез}} \cdot d\tau$  представляет собой механическую энергию, поступающую в зону резания от привода главного движения;

$c \cdot m \cdot d\lambda$  – тепловая энергия, нагревающая массу  $m$ ;

$m$  – нагревающаяся масса части обрабатываемого материала, подвергающегося деформации и превращающегося в стружку под действием тангенциальной составляющей силы резания;

$c$  – удельная теплоемкость нагревающейся массы;

$\lambda$  – разность температур нагревающейся массы и охлаждающей среды (среднее значение), определяется по выражению (2.11) (охлаждающей средой являются стружка, деталь, инструмент, воздух или СОЖ);

$F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau$  – тепловая энергия, отдаваемая нагревающейся массой в охлаждающую среду;

$F_T$  – площадь теплоотдачи нагревающейся массы;

$K_T$  – коэффициент теплоотдачи нагревающейся массы в охлаждающую среду.

$$\lambda = \theta - \theta_{OC}, \quad (2.11)$$

где  $\theta$  – температура в зоне резания металла;

$\theta_{OC}$  – температура охлаждающей среды.

Уравнение (2.10) широко используется для исследования тепловых явлений в разных областях науки, например, для теплового расчета электротехнических установок [24].

Исследование тепловых процессов в зоне резания производится при следующих допущениях:

1) нагревающаяся масса рассматривается как однородное тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью, с одинаковой температурой во всех точках выделения теплоты и точках соприкосновения с охлаждающей средой;

2) теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур  $\lambda$ ;

3) в диссертации под температурой в зоне резания  $\theta$  понимается среднее значение температуры нагревающейся массы с учетом среднего значения температуры охлаждающей среды  $\theta_{OC}$ .

Связь разности температур  $\lambda$  с мощностью  $P_{рез}$  электрической машины привода главного движения может быть установлена по уравнениям (2.10), (2.7):

$$3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{рез} \cdot \eta \cdot \cos \varphi = c \cdot m \cdot \frac{d\lambda}{d\tau} + F_T \cdot K_T \cdot \lambda, \quad (2.12)$$

где  $I_{рез}$  – ток, соответствующий мощности, расходуемой на процесс резания, определяется по выражению:

$$I_{рез} = I_{\phi} - I_{ХХ}, \quad (2.13)$$

где  $I_{ХХ}$  – ток, соответствующий мощности холостого хода.

Уравнение (2.12) относительно температуры  $\theta$  в зоне резания может быть представлено в следующем виде:

$$3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{рез} \cdot \eta \cdot \cos \varphi = c \cdot m \cdot \frac{d(\theta - \theta_{OC})}{d\tau} + F_T \cdot K_T \cdot (\theta - \theta_{OC}). \quad (2.14)$$

2. Для электропривода с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением полезная мощность представляется выражением:

$$P = U \cdot I \cdot \eta, \quad (2.15)$$

где  $U$  – напряжение двигателя постоянного тока с независимым возбуждением;

$I$  – ток якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

В этом случае уравнение (2.14) принимает вид:

$$U \cdot I_{рез} \cdot \eta = c \cdot m \cdot \frac{d(\theta - \theta_{OC})}{d\tau} + F_T \cdot K_T \cdot (\theta - \theta_{OC}). \quad (2.16)$$

## 2.2 Определение температуры в зоне резания по расходу энергии на процесс резания

### 2.2.1 Существующая модель зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания

В зоне резания металлов вследствие пластических деформаций и трения возникает теплота, которая оказывает влияние на коэффициент трения, характер

наростообразования, износ инструмента, качество обработанной поверхности, энергопотребление и другие показатели процесса резания. Особенно важно соблюдение температурно-силовых режимов при обработке жаропрочных материалов, использующихся для изготовления деталей газотурбинных двигателей. Поэтому для правильного выбора условий и режимов обработки необходимо знать закономерности изменения температуры резания в зависимости от влияющих на нее факторов.

Модель зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания независимо от геометрических параметров инструмента может быть представлена эмпирическим уравнением [42]:

$$\theta = C_{\theta} \cdot v^z \cdot s^y \cdot t^x, \quad (2.17)$$

где  $z$ ,  $y$ ,  $x$  – показатели степени при  $v$ ,  $s$ ,  $t$  соответственно при определении температуры в зоне резания.

Параметры модели (2.17) определяют по результатам экспериментов.

Недостатками модели (2.17) являются:

- 1) модель описывает только статические характеристики связи параметров резания с температурой, хотя процесс нагрева является инерционным (2.14);
- 2) физическая сущность коэффициента  $C_{\theta}$  не раскрыта в литературных источниках;
- 3) уравнение (2.17) не раскрывает физическую сущность связи температуры с параметрами резания;
- 4) модель работает в узком диапазоне изменения параметров процесса резания [88].

## 2.2.2 Предлагаемый подход к решению проблемы определения температуры в зоне резания металла

В данной работе предлагается способ определения температуры в зоне резания по затратам энергии электрической машины привода главного движения [80]. Этот способ позволяет контролировать температуру в зоне резания в ходе процесса резания по штатным измерительным устройствам, чаще всего имеющимся в комплекте электропривода, и не требует модернизации механической части станка.

В основу способа заложен закон сохранения энергии (2.1).

В применении к процессу резания закон (2.1) принимает вид уравнения (2.10).

Для определения разности температур  $\lambda$  по уравнению (2.10) необходимо знать нагревающуюся в процессе резания массу  $m$ . Определение этой массы является нерешенной проблемой. Для ее решения рассмотрим положение о «нагреваемом теле».

### 2.2.2.1 Гипотеза о «нагреваемом теле»

В результате анализа уравнения (2.10) 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» [39]. Нагреваемое тело имеет объём  $V_{HT}$ , и массу  $m$ .

Определение величин объема и массы нагреваемого тела является нерешенной проблемой.

В простейшем случае объём нагреваемого тела предлагается представить в виде параллелепипеда  $ADBCA_1D_1B_1C_1$  (рисунок 2.1) [63, 107]. Объем параллелепипеда определяется параметрами процесса резания.

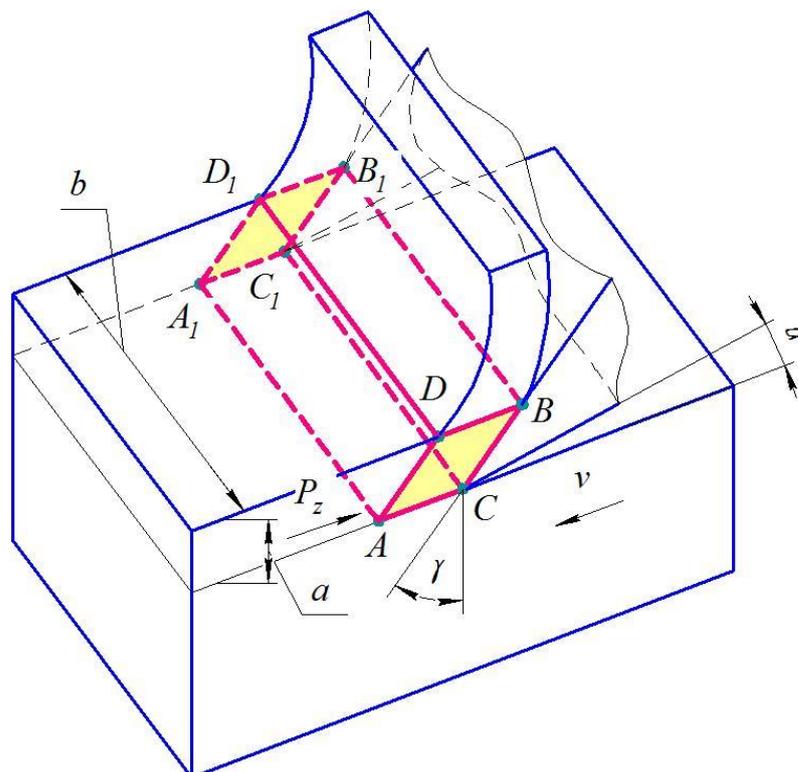


Рисунок 2.1 – Схема формирования нагреваемого тела ( $\alpha$  – задний угол резца;  $\gamma$  – передний угол резца,  $a$  – толщина срезаемого слоя,  $b$  – ширина срезаемого слоя)

Допущения, принимаемые при рассмотрении схемы формирования нагреваемого тела:

1) нагрев нагреваемого тела происходит только в зоне действия тангенциальной силы резания;

2) за величину  $P_z$  принимается среднее значение тангенциальной составляющей силы резания, действующей на переднюю поверхность инструмента;

3) режущий инструмент не имеет износа.

Площадь  $F$  поперечного сечения срезаемого слоя может быть определена выражением:

$$F = a \cdot b. \quad (2.18)$$

Объем нагреваемого тела определяется произведением площади поперечного сечения срезаемого слоя на величину перемещения элементов нагреваемого тела под действием силы  $P_Z$ . Рассмотрим перемещение элементов нагреваемого тела по сечению  $ACBD$ . Величина перемещения элементов нагреваемого тела от начала деформации до выхода из-под действия силы  $P_Z$  равна  $CB$ , при этом точка  $A$  перемещается в точку  $C$ . То есть,  $CA=CB$ , сечение  $ACBD$  нагреваемого тела представляет собой ромб.

Длина перемещения  $CA$  может быть выражена через толщину срезаемого слоя и передний угол инструмента  $\gamma$  следующим образом:

$$CA = \frac{a}{\cos \gamma}. \quad (2.19)$$

Таким образом, объем нагреваемого тела  $V_{HT}$  определяется по выражению:

$$V_{HT} = \frac{a^2}{\cos \gamma} \cdot b. \quad (2.20)$$

Масса нагреваемого тела  $m$  определяется произведением плотности  $\rho$  обрабатываемого материала и объема нагреваемого тела  $V_{HT}$  сечением  $ACBD$  и длиной  $b$ :

$$m = V_{HT} \cdot \rho. \quad (2.21)$$

Время прохождения резца от  $CC_1$  до  $AA_1$  составляет  $\tau_{CA}$  и зависит от скорости резания  $v$ :

$$\tau_{CA} = \frac{CA}{v}. \quad (2.22)$$

С учетом зависимостей (2.19), (2.22) время  $\tau_{CA}$  будет определяться по выражению:

$$\tau_{CA} = \frac{a}{v \cdot \cos \gamma}. \quad (2.23)$$

По параметрам параллелепипеда с учетом плотности материала определяется масса нагреваемого тела. Зная массу и параметры объема нагреваемого тела, можно рассчитать разность температур  $\lambda$ . Удельная теплоемкость  $c$  для каждого материала своя, определяется по соответствующему справочнику.

Из сказанного можно сделать выводы:

- 1) тепло в зоне резания возникает в объемном теле обрабатываемого материала, подвергающемся деформации и превращающемся в стружку под действием тангенциальной составляющей силы резания. Это объемное тело названо «нагреваемым телом»;
- 2) предполагаемый объем нагреваемого тела может быть представлен в виде параллелепипеда, размеры которого зависят от параметров резания;
- 3) масса нагреваемого тела зависит от свойств материала заготовки.

### 2.2.2.2 Нагрев «нагреваемого тела»

Процесс нагрева нагреваемого тела описывается дифференциальным уравнением первого порядка, что даёт возможность представить процесс нагрева в виде динамического звена [7, 10], устанавливающего связь между мощностью резания и разностью температур. Для этого левую и правую части уравнения (2.10) необходимо разделить на  $d\tau$ :

$$P_{рез} = c \cdot m \cdot \frac{d\lambda}{d\tau} + F_T \cdot K_T \cdot \lambda. \quad (2.24)$$

Уравнение (2.24) необходимо представить в операторной форме, используя оператор Лапласа ( $p$ ):

$$P_{рез}(p) = c \cdot m \cdot p \cdot \lambda(p) + F_T \cdot K_T \cdot \lambda(p). \quad (2.25)$$

По уравнению (2.25) составляется передаточная функция  $W(p)$  звена передачи мощности резания  $P_{рез}$  в разность температур  $\lambda$ :

$$W(p) = \frac{\lambda(p)}{P_{рез}(p)} = \frac{1}{F_T \cdot K_T \left( \frac{c \cdot m \cdot p}{F_T \cdot K_T} + 1 \right)}. \quad (2.26)$$

Выражение (2.26) представляет собой уравнение передаточной функции инерционного звена первого порядка, типовая форма записи которого имеет вид:

$$W(p) = \frac{\lambda(p)}{P_{рез}(p)} = \frac{K_{HT}}{T_{HT} \cdot p + 1}, \quad (2.27)$$

где  $K_{HT}$  – коэффициент передачи динамического звена, являющийся статической характеристикой динамического звена, определяется по выражению:

$$K_{HT} = \frac{1}{F_T \cdot K_T}; \quad (2.28)$$

$T_{HT}$  – постоянная времени динамического звена, характеризующая динамические свойства процесса нагрева нагреваемого тела, определяется по выражению:

$$T_{HT} = \frac{c \cdot m}{F_T \cdot K_T}. \quad (2.29)$$

Переходная функция динамического звена первого порядка представляет собой экспоненту, уравнение которой имеет вид:

$$\lambda(\tau) = \Delta P_{рез} \cdot K_{HT} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-\tau}{T_{HT}}} \right), \quad (2.30)$$

где  $\Delta P_{рез}$  – единичный скачок мощности резания.

Учитывая, что в уравнении (2.10) масса нагреваемого тела гипотетическая, требуется произвести проверку гипотезы.

### 2.2.2.3 Методика проверки гипотезы о «нагреваемом теле»

Для проверки гипотезы о нагреваемом теле произведено сравнение его массы, рассчитанной по объему параллелепипеда, и массы нагреваемого тела

неопределенного объема, рассчитанной по закону сохранения энергии с использованием экспериментальных данных [42, 83] при одних и тех же условиях резания.

Сравнительные расчеты произведены для процесса торцового точения. Схема процесса торцового точения представлена на рисунке 2.2.

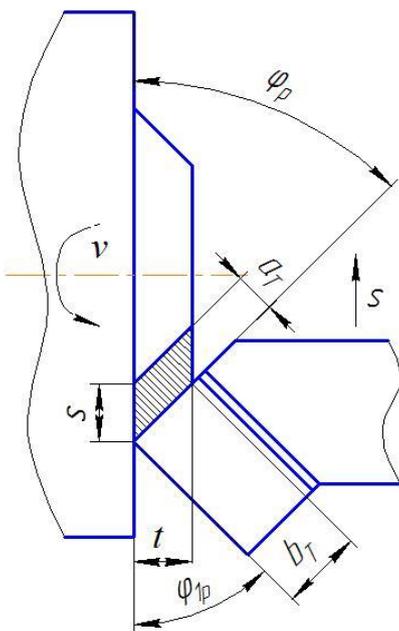


Рисунок 2.2 – Схема процесса торцового точения

Для процесса торцового точения площадь поперечного сечения срезаемого слоя определяется по выражению:

$$F = a_T \cdot b_T = s \cdot t, \quad (2.31)$$

где  $a_T$  – толщина срезаемого слоя при точении,  $a_T = s \cdot \sin \varphi_p$ ;

$b_T$  – ширина срезаемого слоя при точении,  $b_T = t / \sin \varphi_p$ .

Объем нагреваемого тела при торцовом точении:

$$V_T = v \cdot s \cdot t \cdot \tau_T. \quad (2.32)$$

При токарной обработке время  $\tau_T$  выхода нагреваемого тела из-под действия тангенциальной составляющей силы резания в этом случае определяется величиной подачи и скоростью резания:

$$\tau_T = \frac{s}{v}. \quad (2.33)$$

Масса нагреваемого тела при торцовом точении рассчитывается по выражению:

$$m = V_T \cdot \rho. \quad (2.34)$$

Произведем сравнение массы, рассчитанной по уравнению (2.34), с массой, рассчитанной по уравнению (2.10). Сравнение масс, рассчитанных таким образом, позволит судить о возможности представления объема нагреваемого тела в виде параллелепипеда при определении температуры в зоне резания по закону сохранения энергии.

Масса, рассчитанная по уравнению (2.34) названа «теоретической»  $m_T$ . Теоретическая масса нагреваемого тела  $m_T$  рассчитана на основании предложенной гипотезы и представляет собой массу параллелепипеда, которым аппроксимировано нагреваемое тело.

Масса, рассчитанная по уравнению (2.10), не зависит от формы нагреваемого тела. Для ее расчета использованы условия эксперимента [42] по определению температуры методом термо-ЭДС, а также данные справочника [83] для определения тангенциальной составляющей силы резания  $P_Z$ . В этом случае расчетное значение массы нагреваемого тела приближенное. Данная масса названа «экспериментальной»  $m_{\text{э}}$ .

Для определения экспериментальной массы необходимо знать скорость резания. Скорость резания определяется из уравнения (2.17), описывающего связь температуры в зоне резания с параметрами резания.

Мощность, расходуемая на процесс резания определяется по выражению:

$$P_{\text{рез}} = P_Z \cdot v. \quad (2.35)$$

Для расчета силы резания  $P_Z$  при параметрах резания, заданных в [42], использовано уравнение [83]:

$$P_Z = 10 \cdot C_P \cdot t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot v^n \cdot K_P, \quad (2.36)$$

где  $C_P$  – коэффициент, учитывающий условия обработки, при определении составляющей силы резания, выбирается из соответствующих таблиц в [83];

$x_t, y_t, n$  – показатели степени при  $t, s, v$  соответственно при определении составляющей силы резания, определяются по таблицам [83] для конкретных условий обработки;

$K_P$  – поправочный коэффициент, представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания [83]:

$$K_P = K_{MP} \cdot K_{\varphi P} \cdot K_{\gamma P} \cdot K_{\lambda P} \cdot K_{rP}, \quad (2.37)$$

где  $K_{MP}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости, определяется по выражению (2.38) [83];

$K_{\varphi P}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины главного угла в плане резца;

$K_{\gamma P}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины переднего угла резца;

$K_{\lambda P}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины угла наклона главного лезвия резца;

$K_{rP}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины радиуса при вершине резца.

$$K_{MP} = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^{nI}, \quad (2.38)$$

где  $nI$  – показатель степени при определении составляющей силы резания при обработке резцами, выбирается из таблицы [83];

$\sigma_B$  – предел прочности при растяжении.

Из уравнения (2.10) выразим «экспериментальную» массу нагреваемого тела  $m_{\Sigma}$  (2.39). При этом принято допущение, что вся механическая энергия расходуется на нагрев нагреваемого тела, то есть нагрев происходит по

линейному закону. Такое упрощение допустимо, так как предполагается, что теплоотдача в обоих случаях одинакова.

$$m_{\text{э}} = \frac{P_{\text{рез}} \cdot \tau_T}{c \cdot \lambda}, \quad (2.39)$$

где значение  $\tau_T$  определено по выражению (2.33), а значение разности температур  $\lambda$  нагреваемого тела относительно охлаждающей среды определено по выражению (2.11) для оптимальной температуры [42].

Расчет масс произведен для пары материалов: резец ВК6М – деталь ХН77ТЮР, так как в [88] констатируется, что зависимость (2.17) имеет хорошее согласование температуры резания с параметрами режимов резания по скорости резания для труднообрабатываемых сталей, например, ХН77ТЮР.

Расчет произведен при следующих условиях.

Геометрия инструмента [42]:

- передний угол резца  $\gamma = 0^\circ$ ;
- задний угол резца  $\alpha = 10^\circ$ ;
- угол в плане резца  $\varphi = 45^\circ$ .

Свойства материала заготовки:

- плотность  $\rho = 0,008$  г/мм<sup>3</sup> [43];
- удельная теплоемкость материала  $c = 0,495$  кДж·кг<sup>-1</sup>·°С<sup>-1</sup> [91];
- предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 900$  МПа [83].

Режимы резания:

- глубина резания  $t = 1$  мм [42];
- подача  $s$  изменяется в пределах от 0,06 до 1 мм/об;
- скорость резания  $v$  получена из уравнения (2.17) при оптимальной температуре  $\theta_0 = 700$  °С и значениях  $C_\theta = 267$ ,  $z = 0,384$ ,  $y = 0,132$ ,  $x = 0,098$ , приведенных в [42].

Согласно условиям, при которых производился расчет, выбраны из соответствующих таблиц [83] следующие значения коэффициентов и показателей степени:  $n_I = 0,75$ ,  $K_{\varphi P} = 1$ ,  $K_{\gamma P} = 1,1$ ,  $K_{\lambda P} = 1$ ,  $K_{rP} = 0,93$ ,  $C_P = 204$ ,  $x_I = 1$ ,  $y_I = 0,75$ ,  $n = 0$ .

Учитывая, что резание производится без использования СОЖ [42], в данном случае  $\theta_{OC} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Произведено сравнение величины «теоретической»  $m_T$  и «экспериментальной»  $m_{\text{Э}}$  масс нагреваемого тела при различных значениях подачи и постоянных значениях глубины резания и температуры в зоне резания.

Графики зависимостей теоретической  $m_T$  и экспериментальной  $m_{\text{Э}}$  масс нагреваемого тела от подачи  $s$  представлены на рисунке 2.3.

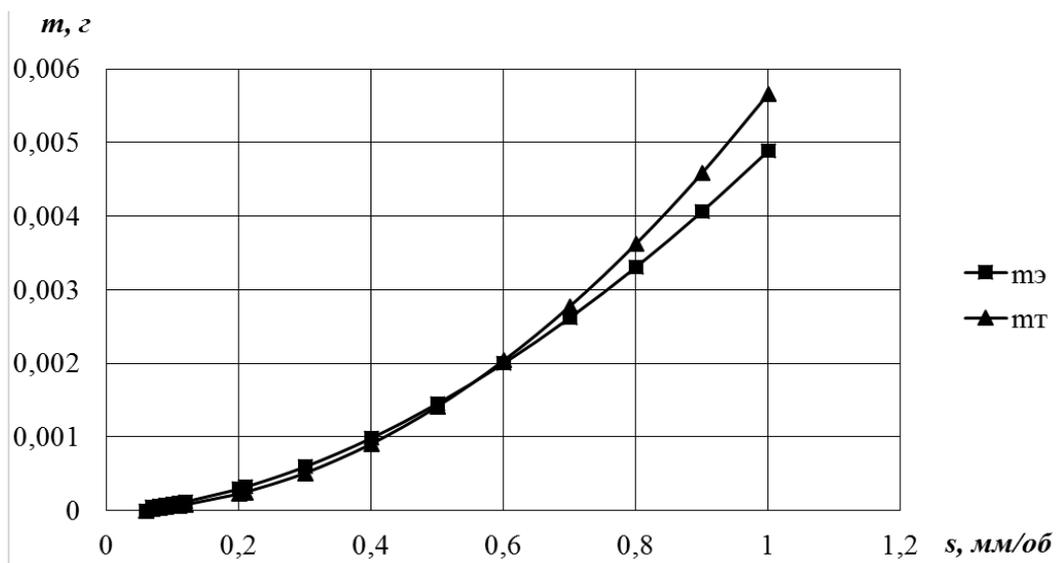


Рисунок 2.3 – Графики зависимостей теоретической  $m_T$  и экспериментальной  $m_{\text{Э}}$  масс нагреваемого тела от подачи  $s$  при торцовом точении

#### 2.2.2.4 Анализ результатов сравнения теоретической и экспериментальной масс нагреваемого тела, подтверждение гипотезы

Визуальное сопоставление полученных графиков зависимостей теоретической  $m_T$  и экспериментальной  $m_{\text{Э}}$  масс нагреваемого тела от подачи  $s$  при торцовом точении (рисунок 2.3) указывает на их качественное сходство.

Это подтверждает гипотезу о «нагреваемом теле» и 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 использованные уравнения (2.17) и (2.36) являются эмпирическими и имеют ряд коэффициентов, полученных экспериментальным путем. Это может являться причиной расхождения графиков теоретической и экспериментальной масс нагреваемого тела.

### **Выводы по главе 2**

1. Установлена связь расхода электроэнергии привода главного движения на процесс резания с температурой в зоне резания.
2. Процесс преобразования мощности резания в температуру резания представлен в виде динамического звена.
3. Разработан способ определения температуры в зоне резания по расходу энергии электрической машины привода главного движения на процесс резания.

### Глава 3. Процесс резания металла и технологическое оборудование как объекты управления

#### 3.1 Силовая часть канала управления температурой в зоне резания

##### 3.1.1 Схема силовой части канала управления температурой в зоне резания

Силовая часть канала управления температурой в зоне резания (канал преобразования электрической энергии в температуру резания) включает в себя следующие элементы (рисунок 3.1):

- преобразователь электрической энергии (ПЭ), позволяющий управлять электроэнергией, поступающей на электродвигатель;
- электродвигатель привода главного движения с системой механических передач станка (Д-С);
- процесс резания металла (ПР).



Рисунок 3.1 – Функциональная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания

На рисунке 3.1  $U_3$  – напряжение управления, задающее частоту;  $f$  – частота, задаваемая преобразователем электрической энергии;  $U_\phi$  – модуль напряжения преобразователя электрической энергии.

Для реализации в виде структурной схемы и использования в САРТ способа измерения температуры в зоне резания по затратам электроэнергии привода главного движения токарного станка необходимо представить связь температуры с параметрами резания в виде динамической модели.

Связь температуры резания с расходом электроэнергии на процесс резания представлена в параграфе 2.1.3.

Одним из достаточно сложных этапов проектирования системы автоматического управления (САУ) является процесс разработки структурных схем динамических моделей элементов САУ. Для каждого нового объекта управления нужна новая структурная схема. Предлагается один из вариантов методики анализа оборудования и процесса механической обработки металла как объектов управления и представления их динамическими моделями. Согласно параграфу 1.1, высокая эффективность процесса резания (получение высокого качества поверхности детали, минимальный износ режущего инструмента, достижение минимальной величины энергоемкости процесса резания, предотвращение перегрева инструмента и др.) возможно при поддержании заданной температуры резания.

Ведение процесса резания с обеспечением постоянства температуры невозможно без построения САРТ, так как процесс резания подвержен действию возмущений, отклоняющих выходную координату от заданного значения. САРТ невозможно построить без динамических моделей элементов силовой части канала управления температурой резания. Для выявления возмущений, определения входных параметров, управляющих воздействий и выходной координаты необходимо рассмотреть эти элементы как объекты управления. Анализ этих элементов как объектов управления выполняется в несколько этапов.

### **3.1.2 Методика анализа элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания как объектов управления**

Методика рассматривается на примере анализа процесса резания [61, 106].

Целью анализа процесса резания (ПР) металла как объекта управления (ОУ) является подготовка к принятию решения о необходимости построения и выборе типа САУ выходной координатой объекта управления.

ОУ в общем виде может быть представлен в виде следующей функциональной схемы (рисунок 3.2).

Под объектом управления рекомендуется понимать объект, для достижения желаемых результатов функционирования которого необходимы и допустимы специально организованные воздействия.

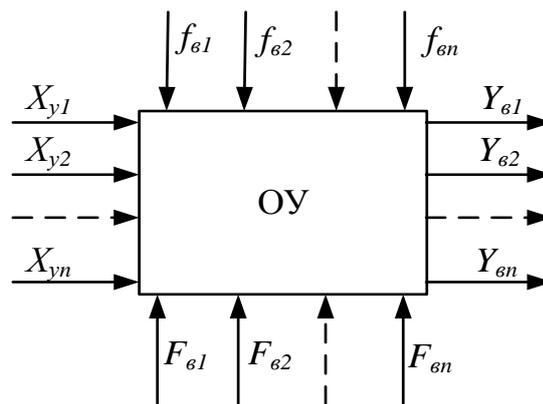


Рисунок 3.2 – Функциональная схема многомерного объекта управления в общем виде

Объект – это выделенная по некоторым правилам часть мира, являющаяся предметом познания практической деятельности.

Воздействие – это влияние одного объекта на другой, вызывающее в последнем изменения его свойств и (или) состояния.

На рисунке 3.2  $Y_{e1}, Y_{e2}, \dots, Y_{en}$  – выходные координаты ОУ, они обязательно имеют количественную оценку.

$X_{y1}, X_{y2}, \dots, X_{yn}$  – управляющие воздействия, то есть воздействия на ОУ, предназначенные для достижения цели управления.

Цель управления – это значения, соотношения значений координат в объекте управления или их изменения во времени, при которых обеспечивается достижение желаемых результатов функционирования объекта. Управляющим воздействием можно регулировать выходные координаты ОУ.

$F_{e1}, F_{e2}, \dots, F_{en}$  – входные параметры объекта управления. Эти параметры могут изменять выходные координаты ОУ, как и управляющие воздействия, но в процессе управления остаются неизменными, поэтому при математическом описании объекта могут быть представлены как коэффициенты, а на функциональной схеме иногда могут быть не показаны.

Параметр объекта – это величина, характеризующая свойство объекта, значения которой определяются по количественной шкале.

$f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{en}$  – возмущения, это воздействия извне на любой элемент (подсистему) системы управления, включая объект управления, затрудняющие, как правило, достижение цели управления. Возмущениями могут быть параметры или отклонения параметров ОУ, влияющие на величину выходных координат и произвольно меняющиеся, их часто бывает невозможно контролировать. Компенсация действия возмущений на выходную координату может быть целью автоматического регулирования управляющего воздействия.

Объект управления, представленный в виде функциональной схемы на рисунке 3.2, является многомерным, то есть таким объектом управления, математическая модель функционирования которого содержит несколько управляющих и (или) выходных координат.

Если САР регулирует только одну выходную координату ОУ, то многомерный ОУ должен быть преобразован в одномерный. Математическая модель функционирования одномерного ОУ содержит одну управляющую координату  $X_u$  и одну выходную координату  $Y_e$  (рисунок 3.3).

Для преобразования многомерного объекта в одномерный разработчик должен прежде всего определиться с тем, какую выходную координату необходимо регулировать. Эта координата определяется требованиями повышения качества управления выходной координатой, поэтому чаще всего задается технологом или специалистом по оборудованию. Изменения других выходных координат не контролируются, однако по диапазону изменения этих

координат могут быть заданы ограничения, что необходимо будет учитывать при проектировании САР.

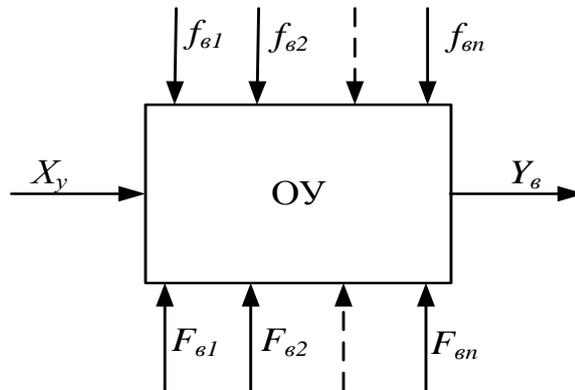


Рисунок 3.3 – Функциональная схема одномерного объекта управления

После выбора выходной координаты разработчик определяет управляющее воздействие. Управляющее воздействие выбирается исходя из условий наиболее простой реализации устройства, регулирующего управляющее воздействие ОУ. При прочих равных условиях управляющее воздействие выбирается исходя из условия, что выбранная управляющая координата эффективнее других может изменять выходную координату. Оставшиеся управляющие воздействия многомерного ОУ относят к возмущениям или к входным параметрам ОУ. При исследовании динамических свойств объекта следует воспользоваться методами замороженных коэффициентов и замороженных реакций.

### 3.1.3 Этапы анализа процесса резания как объекта управления

Анализ процесса резания как объекта управления может быть выполнен в несколько этапов:

- 1) определение состава возможных выходных координат ОУ;
- 2) выбор выходной координаты, количественно характеризующей ход ПР;

3) выполнение математического описания ОУ, определяющего связи между выходной координатой  $Y_e$  и воздействиями  $X_y, f_e, F_e$ . Математическое описание может быть взято из литературы или на основе математической обработки результатов, экспериментов и получения эмпирических уравнений связей;

4) определение ограничений, в условии которых должен производиться ПР;

5) определение состава управляющих координат;

6) выбор управляющей координаты, оказывающей самое эффективное воздействие на выходную координату при соответствующих ограничениях;

7) определение состава возмущений;

8) определение диапазона изменения возмущений;

9) определение отклонения выходной координаты при совместном действии возмущений;

10) определение диапазона изменения управляющего воздействия, с целью компенсации действия возмущений;

11) определение заданной точности регулирования выходной координаты;

12) разработка структурной схемы ОУ;

13) принятие решения о типе САУ, которая может реализовать цель управления объектом.

### **3.1.4 Принятие решения о типе системы автоматического управления, которая может реализовать цель управления объектом**

Принятие решения о типе САУ, которая может реализовать цель управления объектом, осуществляется в несколько этапов.

1. Определяется в замкнутой системе статическая точность поддержания выходной координаты по заданию –  $\Delta_3\%$  или абсолютное значение  $\Delta_3$ , то есть в каких пределах допускается отклонение выходной координаты от минимального

заданного значения при совместном действии всех возмущений в статическом режиме.

2. Определяется в разомкнутой системе фактическая величина отклонения выходной координаты от минимального заданного значения при совместном действии всех тех же возмущений в статическом режиме –  $\Delta_P\%$  или абсолютное значение  $\Delta_P$ .

3. Сравнивается  $\Delta_3\%$  и  $\Delta_P\%$  или  $\Delta_3$  или  $\Delta_P$ , если  $\Delta_P\%$  больше  $\Delta_3\%$  или  $\Delta_P$  больше  $\Delta_3$ , то необходимо применение замкнутой САУ.

4. Если  $\Delta_3\%$  или  $\Delta_3$  больше точности измерительной системы выходной координаты, то возможно применение статической САР. В этом случае коэффициент разомкнутой системы определяется по выражению (3.1) или (3.2):

$$\Delta_3\% = \frac{\Delta_P\% + \Delta_{II}\%}{1 + K_{PC}}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta_{II}\%$  – точность измерения минимального значения выходной координаты измерительным устройством (прибором);

$K_{PC}$  – расчётное значение коэффициента разомкнутой системы, обеспечивающего заданную точность САР при заданном диапазоне изменения возмущений;

$$\Delta_3 = \frac{\Delta_P + \Delta_{II}}{1 + K_{PC}}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta_{II}$  – абсолютное значение ошибки прибора.

Если САР при расчетном значении коэффициента разомкнутой системы оказывается неустойчивой, то может возникнуть необходимость создания внутренних контуров САР, компенсирующих действие части возмущений, и (или) применить контуры адаптации.

5. Если регламентируется динамическая ошибка  $\delta$  выходной координаты в переходных режимах, то необходимо применение астатической САР. В этом случае статическая ошибка, если возмущение поступает в структурную схему

после интегратора, равна точности измерителя выходной координаты, а динамическая ошибка определяется по выражению:

$$\delta = \frac{\dot{X}_y}{K_{PC\delta}}, \quad (3.3)$$

где  $\dot{X}_y$  – заданное значение максимальной скорости изменения управляющей координаты;

$K_{PC\delta}$  – коэффициент разомкнутой астатической САР, обеспечивающий заданное значение  $\delta$  при заданном  $\dot{X}$ .

При невозможности стабилизации САР с расчетным значением  $K_{PC\delta}$  нужно применить внутренние контуры, компенсирующие часть возмущений и (или) применить контуры адаптации, так же как в статической САР.

### 3.2 Анализ процесса резания как объекта управления

Для определения состава возмущений и связи температуры в зоне резания с параметрами процесса резания, составления функциональной и структурной схем, необходимо произвести анализ процесса преобразования мощности резания в температуру в зоне резания как объекта управления.

Анализ произведен для процесса торцового точения по методике, приведенной в параграфе 3.1:

1), 2) выходной координатой для САРТ является температура в зоне резания металла  $\theta$ , которая имеет количественную оценку °С;

3) математическое описание связи мощности, затрачиваемой на процесс резания, с температурой в зоне резания может быть представлено уравнением:

$$P_{рез} = c \cdot m \cdot \frac{d\lambda}{d\tau} + F_T \cdot K_T \cdot \lambda,$$

где температура нагреваемого тела определяется по выражению (2.11), мощность, расходуемая на процесс резания определяется по выражению (2.35), масса

нагреваемого тела определяется по выражению (2.34), а объем нагреваемого тела – по выражению (2.32):

$$\lambda = \theta - \theta_{oc},$$

$$P_{рез} = P_Z \cdot v,$$

$$m = V_T \cdot \rho,$$

$$V_T = v \cdot s \cdot t \cdot \tau_T = s^2 \cdot t.$$

В уравнении (2.24) слагаемое  $F_T \cdot K_T \cdot \lambda$  представляет собой мощность теплового потока отдачи тепла. Отдача тепла нагреваемого тела происходит в нескольких направлениях (рисунок 1.3):

– передача тепла от нагреваемого тела в деталь через площадь  $AA_1C_1C - F_{T1}$  с коэффициентом теплоотдачи  $K_{T1}$  (теплота  $q_3$  по [15]);

– передача тепла от нагреваемого тела в резец через площадь  $CC_1B_1B - F_{T2}$  с коэффициентом теплоотдачи  $K_{T2}$  (теплота  $q_2$  по [15]);

– передача тепла от нагреваемого тела в окружающую среду (воздух) через площадь  $ADBC - F_{T3}$  с коэффициентом теплоотдачи  $K_{T3}$  (теплота  $q_4$  при резании всухую по [15]);

– передача тепла от нагреваемого тела в СОЖ через площадь  $F_{T4}$  с коэффициентом теплоотдачи  $K_{T4}$  (теплота  $q_4$  при резании с применением СОЖ по [15]);

– передача тепла от нагреваемого тела в стружку через площадь  $DBB_1D_1 - F_{T5}$  с коэффициентом теплоотдачи  $K_{T5}$  (теплота  $q_1$  по [15]).

Тепловая энергия, отдаваемая нагреваемым телом в охлаждающую среду определяется выражением:

$$F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau = (F_{T1} \cdot K_{T1} + F_{T2} \cdot K_{T2} + F_{T3} \cdot K_{T3} + F_{T4} \cdot K_{T4} + F_{T5} \cdot K_{T5}) \cdot \lambda \cdot d\tau \quad (3.4)$$

Уравнение (2.24) с учетом выражений (2.11), (2.35), (2.34), (2.32), (3.4) может быть представлено в виде уравнения:

$$P_Z \cdot v = c \cdot s^2 \cdot t \cdot \rho \cdot \frac{d\lambda}{d\tau} + (F_{T1} \cdot K_{T1} + F_{T2} \cdot K_{T2} + F_{T3} \cdot K_{T3} + F_{T4} \cdot K_{T4} + F_{T5} \cdot K_{T5}) \cdot \lambda; \quad (3.5)$$

4) определение ограничений, при которых должен осуществляться процесс резания:

- величина  $P_Z$  соответствует вновь заточенному резцу;
- $c$  – среднее значение удельной теплоемкости обрабатываемого материала;
- температура в зоне резания равномерно распределена по массе нагреваемого тела;

- подача СОЖ в зону резания должна быть стабильной;

5), 6) согласно уравнению (3.5) управляющей координатой принимается скорость резания  $v$ ;

7) анализ уравнения (3.5) на наличие возмущений.

Кроме скорости резания, на объект управления действуют величины подачи  $s$  и глубины резания  $t$ . Поэтому они также являются воздействиями на объект управления. В процессе резания величины  $s$  и  $t$  могут изменяться.

Глубина резания  $t$  может отклоняться от заданного значения  $t_0$  на величину  $\Delta t$ . Заданная глубина резания  $t_0$  принимается как входной параметр,  $\Delta t$  принимается как возмущение. Таким образом, фактическая глубина резания определяется выражением:

$$t = t_0 + \Delta t. \quad (3.6)$$

Причинами отклонения глубины резания могут быть: отклонение формы детали в результате предыдущей обработки – бочкообразность, седлообразность, изогнутость оси, конусообразность и др.

Величина подачи  $s$  может колебаться, например, из-за перепадов напряжения в сети на ( $\pm 10\%$ ) номинального значения [13]. Пропорционально перепадам напряжения изменяется и подача. Кроме того, скорость подачи может изменяться от колебаний момента нагрузки привода подачи и от изменения

сопротивления обмоток двигателя в тех случаях, когда электропривод не автоматизирован.

Заданное значение подачи принимается за  $s_0$ . Изменение подачи –  $\Delta s$ . Величина  $s_0$  является неизменной, поэтому ее можно считать входным параметром. Величина  $\Delta s$  является возмущением. Таким образом, фактическая величина подачи определяется выражением:

$$s = s_0 + \Delta s. \quad (3.7)$$

Кроме того, возмущением является температура охлаждающей среды  $\theta_{OC}$ ;

8), 9) при действии возмущений значение выходной координаты будет отличаться от значения заданной координаты. Поэтому при проектировании конкретной САР их действие должно быть учтено;

10) как правило, диапазон изменения управляющего воздействия гораздо шире диапазона действия возмущений, так как в качестве управляющей координаты принимается параметр, наиболее эффективно действующий на выходную координату;

11) точность САР регламентируется требованиями технолога. Чем выше точность поддержания выходной координаты, тем выше качество САР и выше качество процесса резания;

12) таким образом, процесс резания как объект управления может быть представлен в виде функциональной схемы (рисунок 3.4);

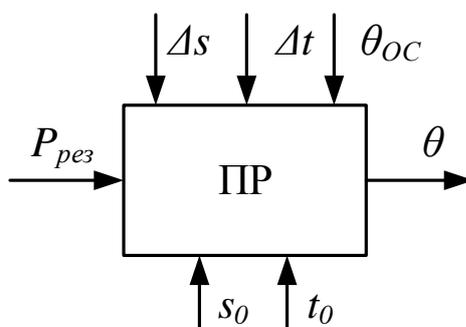


Рисунок 3.4 – Функциональная схема процесса резания как объекта управления

Структурная схема процесса резания как объекта управления разрабатывается на основе уравнения (3.5). Для этого уравнения (3.5) и (2.11) должны быть преобразованы в операторную форму:

$$P_z(p) \cdot v(p) = c \cdot t(p) \cdot s^2(p) \cdot \rho \cdot p \cdot \lambda(p) + (F_{T1} \cdot K_{T1} + F_{T2} \cdot K_{T2} + F_{T3} \cdot K_{T3} + F_{T4} \cdot K_{T4} + F_{T5} \cdot K_{T5}) \cdot \lambda(p), \quad (3.6)$$

$$\lambda(p) = \theta(p) - \theta_{oc}(p). \quad (3.7)$$

В соответствии с уравнениями (3.6), (3.7) структурная схема связи температуры в зоне резания с параметрами процесса резания при торцовом точении, может быть представлена в виде рисунка 3.5.

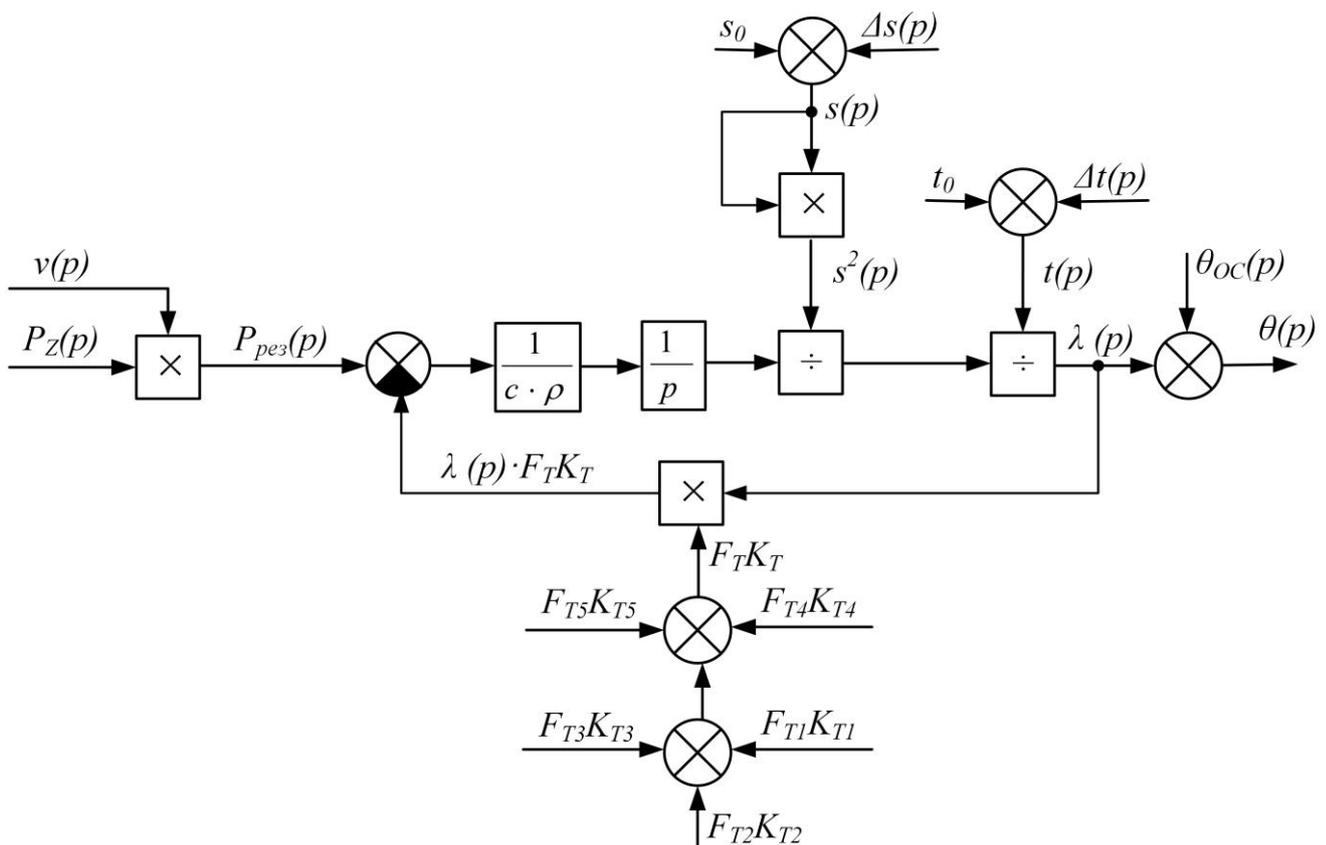


Рисунок 3.5 – Структурная схема процесса резания при торцовом точении как объекта управления

Структурная схема содержит ряд нелинейных элементов. Наличие нелинейных элементов является признаком того, что процесс резания при

торцевом точении представляет собой инерционное звено первого порядка с переменными параметрами;

13) учитывая, что процесс резания подвержен действию возмущений, вызывающих отклонение выходной координаты, необходимо применить САР температуры в зоне резания, обеспечивающую поддержание выходной координаты с высокой точностью.

### 3.3 Система «электродвигатель привода главного движения – станок» как объект управления

Рассмотрим случай, когда для вращения шпинделя токарного станка применён асинхронный трёхфазный электродвигатель с частотным управлением.

Выходной координатой электродвигателя привода главного движения станка является угловая частота вращения вала  $\omega_{ДВ}$ . Вал электродвигателя через редуктор станка вращает шпиндель с угловой частотой  $\omega_{Ш}$ , которая определяется по выражению:

$$\omega_{Ш} = \frac{\omega_{ДВ}}{i}, \quad (3.8)$$

где  $i$  – передаточное отношение редуктора станка [12].

Шпиндель вращается с угловой частотой  $\omega_{Ш}$ . Радиус резания детали  $R_3$ . При этом скорость резания  $v$  определяется выражением:

$$v = \omega_{Ш} \cdot R_3. \quad (3.9)$$

Нагрузкой двигателя является  $P_Z$ , которая определяется выражением:

$$P_Z = \frac{M_{Ш}}{R_3}, \quad (3.10)$$

где  $M_{Ш}$  – момент шпинделя станка, определяется по выражению:

$$M_{Ш} = M \cdot i, \quad (3.11)$$

где  $M$  – момент двигателя привода главного движения станка.

Управляющими координатами электродвигателя являются частота, задаваемая преобразователем электрической энергии  $f$  и величина напряжения преобразователя энергии  $U_\phi$ . При регулировании угловой частоты вращения вала электродвигателя отношение напряжения к частоте преобразователя электрической энергии остаётся неизменным.

Для определения полного состава возмущений, действующих на канал превращения электрической энергии в температуру резания, рассмотрим возмущения, действующие на электрическую часть канала.

### 3.3.1 Возмущающие воздействия электродвигателя

Электродвигатель при выполнении процесса резания работает с переменной нагрузкой, в результате чего его нагрев изменяется. При нагреве электродвигателя от  $20^\circ\text{C}$  до номинальной температуры  $80^\circ\text{C}$  сопротивление обмоток изменяется на 25% номинального значения [7]. То есть сопротивление обмотки статора  $R_1$  является величиной переменной:

$$R_1 = R_{10} + \Delta R_1, \quad (3.12)$$

где  $R_{10}$  – сопротивление обмотки статора при  $20^\circ\text{C}$ ;

$\Delta R_1$  – приращение сопротивления обмотки статора при нагреве до номинальной температуры.

Сопротивление обмотки ротора, приведённое к цепи статора  $R'_2$ , так же является величиной переменной:

$$R'_2 = R'_{20} + \Delta R'_2, \quad (3.13)$$

где  $R'_{20}$  – сопротивление обмотки ротора, приведённое к цепи статора при  $20^\circ\text{C}$ ;

$\Delta R'_2$  – приращение сопротивления обмотки ротора, приведённое к цепи статора при номинальной температуре.

Электромагнитный момент двигателя  $M$  является совокупностью статической  $M_{СТ}$  и динамической  $M_{ДИН}$  составляющих:

$$M = M_{CT} + M_{ДИН} . \quad (3.14)$$

Статическая составляющая момента двигателя в процессе резания металла изменяется в пределах от момента холостого хода  $M_{ХХ}$  до момента, характеризуемого статической нагрузкой процесса резания:

$$M_{CT} = M_{ХХ} + \Delta M_C , \quad (3.15)$$

где  $\Delta M_C$  – изменение момента нагрузки, возникающего в процессе резания.

Динамический момент  $M_{ДИН}$  также является величиной переменной, он зависит от изменения скорости вращения вала электродвигателя и от изменения момента инерции  $J$  вращающихся частей:

$$M_{ДИН} = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.16)$$

В процессе резания изменяется радиус обрабатываемой детали, в результате чего изменяется и момент инерции  $J$ :

$$J = J_0 + \Delta J , \quad (3.17)$$

где  $J_0$  – минимальный момент инерции (момент инерции вращающихся частей станка без заготовки);

$\Delta J$  – возможное приращение момента инерции (зависит от массы заготовки).

Таким образом, основными возмущениями, действующими на электродвигатель, являются  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2'$ ,  $\Delta M_C$ ,  $\Delta J$ .

На основании математического описания асинхронного электродвигателя [38, 41] составлены функциональная (рисунок 3.6) и структурная (рисунок 3.10) схемы системы «электродвигатель привода главного движения-станок» (Д-С).

### **3.3.2 Механизм преобразования скорости вращения двигателя привода главного движения в скорость резания**

Механическая энергия от двигателя к станку передается при помощи ременной передачи или эластичной муфты, представляющих собой упругое звено.

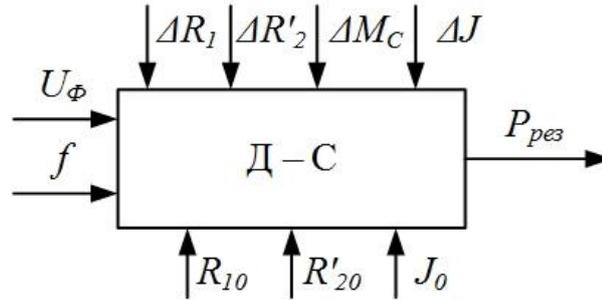


Рисунок 3.6 – Функциональная схема системы «электродвигатель привода главного движения – станок» (Д-С) как объекта управления

Упругое звено создает момент сопротивления двигателю  $M_{\Pi}$ . Таким образом, электромагнитный момент двигателя определяется по выражению:

$$M = M_{XX(Д-С)} + M_{\Pi} + J_1 \cdot \frac{d\omega_{ДВ}}{d\tau}, \quad (3.18)$$

где  $M_{XX(Д-С)}$  – момент холостого хода системы Д-С;

$J_1$  – момент инерции электродвигателя.

Выражение (3.18) в операторной форме имеет вид:

$$M(p) = M_{XX(Д-С)} + M_{\Pi}(p) + J_1 \cdot p \cdot \omega_{ДВ}(p). \quad (3.19)$$

Момент сопротивления двигателю  $M_{\Pi}$ , создаваемый упругим звеном, определяется выражением в операторной форме:

$$M_{\Pi}(p) = K_V \cdot \Delta\varphi(p), \quad (3.20)$$

где  $K_V$  – коэффициент упругости упругого звена;

$\Delta\varphi$  – разница углов поворота на входе упругого звена и на его выходе, которая определяется уравнением:

$$\Delta\varphi(p) = \varphi_1(p) - \varphi_2(p), \quad (3.21)$$

где  $\varphi_1$  – угол на входе упругого звена, определяется по выражению (3.22);

$\varphi_2$  – угол на выходе упругого звена, определяется по выражению (3.23):

$$\varphi_1(p) = \frac{\omega_{ДВ}(p)}{p}, \quad (3.22)$$

$$\varphi_2(p) = \frac{\omega_2(p)}{p}, \quad (3.23)$$

где  $\omega_2$  – угловая частота на выходе упругого звена с учетом приведения к валу двигателя, определяется по выражению:

$$M_2(p) = \Delta M_{C2}(p) + J_2 \cdot p \cdot \omega_2(p), \quad (3.24)$$

где  $M_2$  – момент нагрузки на выходе упругого звена, приведенный к валу двигателя;

$\Delta M_{C2}$  – момент сопротивления, создаваемый процессом резания, приведенный к валу двигателя;

$J_2$  – момент инерции приведенных к валу двигателя вращающихся частей, приводящих в движение шпиндель, определяется по выражению (3.26).

Согласно выражению (3.24):

$$\omega_2(p) = \frac{M_2(p) - \Delta M_{C2}(p)}{J_2 \cdot p}, \quad (3.25)$$

$$J_2 = J_{20} + \Delta J_2, \quad (3.26)$$

где  $J_{20}$  – момент инерции шкива ременной передачи, редуктора и шпинделя, приведенных к валу двигателя;

$\Delta J_2$  – момент инерции обрабатываемой детали, приведенных к валу двигателя.

С учетом уравнения (3.26) выражение (3.25) принимает вид:

$$\omega_2(p) = (M_2(p) - \Delta M_{C2}(p)) \cdot \frac{1}{(J_{20} + \Delta J_2) \cdot p}. \quad (3.27)$$

Угловая частота вращения шпинделя  $\omega_{ш}$  с выходной координатой упругого звена  $\omega_2$  связаны уравнением:

$$\omega_{ш} = \frac{\omega_2}{i}. \quad (3.28)$$

Зависимость скорости резания  $v$  от угловой частоты вращения шпинделя  $\omega_{ш}$  и радиуса резания  $R_3$ , задаваемого системой ЧПУ описывается уравнением (3.9).

Момент шпинделя  $M_{Ш}$ , возникающий при резании, через передаточное отношение механизма  $i$  передается через механизм между двигателем и шпинделем в виде переменной  $\Delta M_{C2}$ :

$$\Delta M_{C2} = \frac{M_{Ш}}{i} \quad (3.29)$$

Момент шпинделя есть произведение радиуса резания  $R_3$  и тангенциальной составляющей силы резания  $P_Z$ :

$$M_{Ш} = R_3 \cdot P_Z. \quad (3.30)$$

По уравнениям (3.18) - (3.30) составлена структурная схема преобразования скорости вращения двигателя в скорость резания (рисунок 3.7).

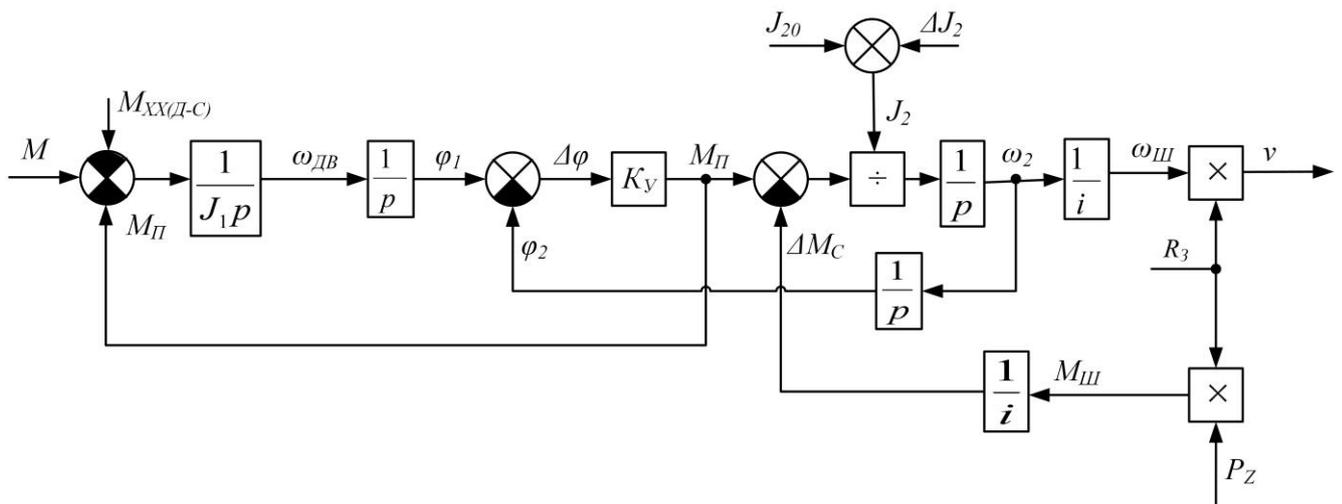


Рисунок 3.7 – Структурная схема процесса преобразования момента двигателя привода главного движения в скорость резания с учетом упругости ременной передачи

### 3.4 Преобразователь электрической энергии как объект управления

В рассматриваемом примере в качестве преобразователя энергии, потребляемой из промышленной сети для выполнения процесса резания металла,

использован электронный двухзвенный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН).

Управляющей координатой преобразователя энергии является напряжение управления  $U_3$ , задающее частоту. Пропорционально изменению частоты изменяется величина напряжения преобразователя электрической энергии  $U_\phi$ . Преобразователь частоты подключен к промышленной сети, на него действует возмущение  $\Delta U_C$ , возникающее от колебаний сетевого напряжения.

Для регулирования угловой частоты вращения вала  $\omega_{ДВ}$  асинхронного электродвигателя токарного станка одновременно с изменением частоты  $f$  необходимо изменять напряжение электродвигателя  $U_\phi$ . При регулировании частоты и напряжения электродвигателя изменяется скважность импульсов, частота которых равна частоте переключения  $f_k$  (коммутации) транзисторов в АИН, а их амплитуда остается постоянной и равной напряжению выпрямителя  $U_{d0}$ . Величина  $U_{d0}$  зависит от сетевого напряжения. Для мостовой трёхфазной схемы выпрямления  $U_{d0} = 1,35U_L$ . Однако линейное напряжение промышленной сети  $U_L$  согласно [13] может отклоняться от номинального значения  $U_H$  на  $\pm 10\%U_H$ . Поэтому в качестве базового напряжения в сети нужно взять его минимальное значение  $U_{Cmin}$ . То есть, если напряжение сети  $U_H = 380$  В, то  $U_{Cmin} = 380 - 57 = 323$  В. А максимальное напряжение будет составлять  $U_{Cmax} = 418$  В. Максимальное колебание напряжения будет составлять  $\Delta U_C = U_{Cmax} - U_{Cmin} = 95$  В, что составляет  $30\%U_{Cmin}$ . Величина  $\Delta U_C$  является возмущающим воздействием преобразователя энергии как объекта управления.

Таким образом, управляющим воздействием преобразователя энергии является напряжение задания частоты  $U_3$ . Выходные координаты преобразователя энергии:  $U_\phi$  – модуль напряжения преобразователя электрической энергии,  $f$  – частота напряжения инвертора, подаваемые на электродвигатель.

Функциональная схема преобразователя энергии как объекта управления представлена на рисунке 3.7, структурная схема представлена на рисунке 3.10.

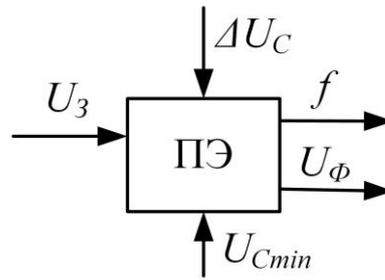


Рисунок 3.7 – Функциональная схема преобразователя энергии как объекта управления

### 3.5 Модель тангенциальной составляющей силы резания

В процессе резания возникает тангенциальная составляющая силы резания. Для составления структурной схемы силы  $P_Z$  воспользуемся [30].

#### 3.5.1 Тангенциальная составляющая силы резания

Тангенциальная составляющая силы резания зависит от параметров процесса резания и определяется в общем виде выражением (2.36) [83], приведенным в параграфе 2.2.2.3:

$$P_Z = 10 \cdot C_P \cdot t^{x1} \cdot s^{y1} \cdot v^n \cdot K_P.$$

Однако, формула (2.36) не учитывает изменение силы резания, связанное с износом инструмента. Поэтому в уравнение (2.36) необходимо добавить составляющую силы резания от износа инструмента  $P_h$ . В этом случае уравнение (2.36) принимает вид:

$$P_Z = 10 \cdot C_P \cdot t^{x1} \cdot s^{y1} \cdot v^n \cdot K_P + P_h. \quad (3.31)$$

Уравнение (3.31) может быть представлено как:

$$P_Z = P_{Z0} + P_h, \quad (3.32)$$

где  $P_{Z0}$  – тангенциальная составляющая силы резания, возникающая в начале резания вновь заточенным резцом, определяется выражением:

$$P_{Z0} = 10 \cdot C_P \cdot t^{x1} \cdot s^{y1} \cdot v^n \cdot K_P. \quad (3.33)$$

Согласно исследованиям [20] можно считать, что сила резания от износа инструмента изменяется по линейному закону в зависимости от длины пути в направлении результирующего движения резания  $L_C$ . То есть приращение силы  $P_h$  от износа инструмента может быть описано зависимостью:

$$P_h = K_C \cdot L_C, \quad (3.34)$$

где  $K_C$  – коэффициент пропорциональности  $P_h$  и  $L_C$ .

Если взять за точку отсчета  $P_{Z0}$ , то приращение силы  $P_h$  от износа инструмента может быть описано зависимостью:

$$P_h = P_Z - P_{Z0}. \quad (3.35)$$

Структурная схема связи  $P_Z$  с параметрами процесса резания составлена на основе уравнений (3.31) - (3.34) и представлена на рисунке 3.8.

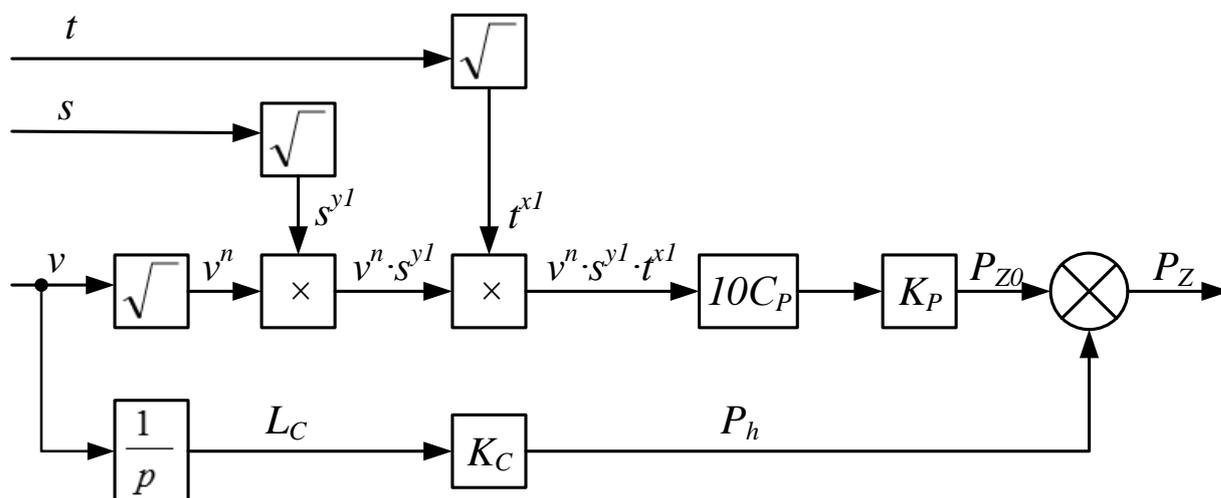


Рисунок 3.8 – Структурная схема связи  $P_Z$  с параметрами процесса резания

### 3.6 Функциональная схема силовой части канала управления температурой резания как объекта управления

На основании материалов, изложенных в параграфах 3.1-3.5, разработана функциональная схема силовой части канала управления температурой резания как объекта управления (рисунок 3.9).

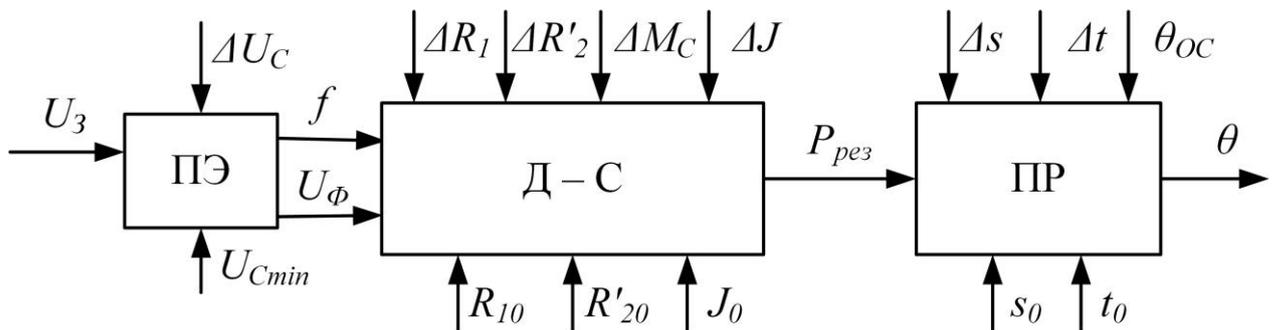


Рисунок 3.9 – Функциональная схема силовой части канала управления температуры в зоне резания как объекта управления

При составлении функциональной схемы установлена математическая связь между элементами силовой части и температурой в зоне резания.

Определены возмущающие воздействия каждого из элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания.

Наличие возмущающих воздействий вызывает необходимость создания САР температуры в зоне резания.

### 3.7 Структурная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания

Структурная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания металла, разработанная на основании функциональной схемы (рисунок 3.9) и на основании математического описания, выполненного в параграфах 3.1-

3.6, включает в себя структурные схемы преобразователя энергии, системы Д-С, процесса резания металла и представлена на рисунке 3.10 (все переменные выражены в операторной форме). В ней учтено действие возмущений, действие тангенциальной составляющей силы резания [31, 62]. Структурная схема содержит несколько нелинейных элементов в виде блоков умножения, деления и функциональных преобразователей. При использовании схемы для анализа и синтеза САРТ, она должна быть линеаризована.

На рисунке 3.10 СУ – система управления;  $K_{Пф}$  – коэффициент передачи преобразователя частоты;  $p_{ДВ}$  – число пар полюсов двигателя;  $\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля двигателя;  $S_{Д}$  – скольжение двигателя;  $M_1$  – момент, создаваемый одной фазой двигателя;  $K_{ПЭ}$  – коэффициент передачи преобразователя энергии по напряжению;  $U_d$  – текущее линейное напряжение преобразователя энергии;  $I'_2$  – ток цепи статора с учетом приведения сопротивления ротора к цепи статора;  $K_{ПЭ}$  – коэффициент передачи преобразователя энергии по напряжению;  $T$  – постоянная времени преобразователя энергии;  $p$  – оператор Лапласа;  $\xi$  – коэффициент демпфирования преобразователя энергии;  $Z_{Д}$  – полное сопротивление обмоток ротора и статора двигателя;  $X_{1Д}$  – реактивное сопротивление обмотки статора;  $X'_{2Д}$  – реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное в цепь статора.

### 3.8 Канал управления подачей

#### 3.8.1 Математическое описание динамических свойств электромеханического преобразователя механизма подачи

В целях получения методического материала, произведено математическое описание канала управления механизма подачи на основании машины постоянного тока с независимым возбуждением при двухзонном регулировании скорости.

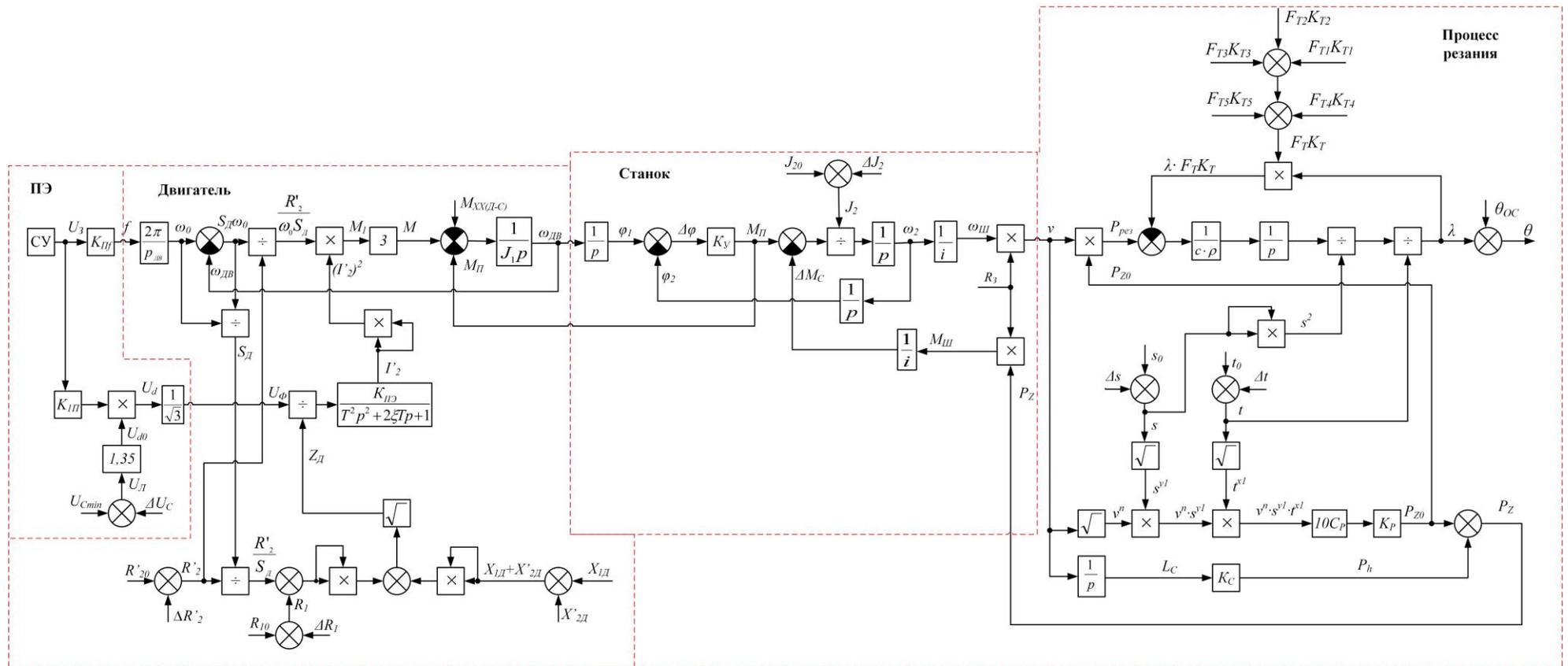


Рисунок 3.10 – Структурная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания металла при торцовом точении

Математическое описание динамических свойств электромеханического преобразователя выполнено в операторной форме для машины постоянного тока с независимым возбуждением на основании типовой схемы замещения якорной цепи и цепи возбуждения [62].

### **Выходная координата и воздействия.**

Выходной координатой канала управления механизма подачи является угловая частота вращения двигателя привода подачи  $\omega_{ДП}$ .

Управляющей координатой цепи якоря является напряжение обмотки якоря  $U_{ПЭЯ}$ .

Управляющей координатой цепи возбуждения является напряжение обмотки возбуждения  $U_B$ .

Возмущения и входные параметры.

В процессе резания изменяются: момент инерции перемещающихся частей, механическая нагрузка и нагрев двигателя, сопротивление обмоток двигателя.

При ослаблении магнитного потока изменяется магнитная проницаемость магнитопровода двигателя.

Сопротивление якорной цепи  $R_{ЯЦ}$  определяется выражением:

$$R_{ЯЦ} = R_{ЯЦ0} + \Delta R_{ЯЦ}, \quad (3.36)$$

где  $R_{ЯЦ0}$  – сопротивление якорной цепи при температуре 20 °С,

$\Delta R_{ЯЦ}$  – изменение сопротивления якорной цепи при нагреве двигателя до номинальной температуры.

Сопротивление обмотки возбуждения  $R_B$  определяется по выражению:

$$R_B = R_{B0} + \Delta R_B, \quad (3.37)$$

где  $R_{B0}$  – сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20 °С,

$\Delta R_B$  – изменение сопротивления обмотки возбуждения при нагреве двигателя до номинальной температуры.

Момент сопротивления двигателя подачи  $M_{СП}$  определяется по выражению:

$$M_{СП} = M_{ХП} + \Delta M_{СП}, \quad (3.38)$$

где  $M_{ХХП}$  – момент холостого хода механизма подачи;

$\Delta M_{СП}$  – изменение момента сопротивления нагрузки двигателя подачи.

Эквивалентный момент инерции, приведенный к валу двигателя механизма подачи  $J_{П}$  определяется по выражению:

$$J_{П} = J_{0П} + \Delta J_{П}, \quad (3.39)$$

где  $J_{0П}$  – минимальное значение момента инерции механизма подачи;

$\Delta J_{П}$  – изменение момента инерции механизма подачи за счет изменения передаточного числа редуктора механизма подачи.

Магнитная проницаемость железа  $\mu$  (магнитопровода двигателя) определяется по выражению:

$$\mu = \mu_1 + \Delta\mu, \quad (3.40)$$

где  $\mu_1$  – магнитная проницаемость железа при температуре 20 °С;

$\Delta\mu$  – изменение магнитной проницаемости железа при уменьшении потока возбуждения.

Таким образом, согласно уравнениям (3.36) - (3.40) возмущениями являются  $\Delta R_{ЯЦ}$ ,  $\Delta R_{В}$ ,  $\Delta M_{СП}$ ,  $\Delta J_{П}$ ,  $\Delta\mu$ , входными параметрами являются  $R_{ЯЦ0}$ ,  $R_{В0}$ ,  $M_{ХХП}$ ,  $J_{0П}$ ,  $\mu_1$ .

### **Математическое описание цепей якоря и возбуждения.**

Уравнения связи механических и электрических параметров двигателя привода механизма подачи в операторной форме с учетом их переменности имеют вид (3.41) - (3.48):

$$U_{ПЭЯ}(p) = (R_{ЯЦ0} + \Delta R_{ЯЦ}) \cdot I_{Я}(p) + L_{Я.Ц.} \cdot p \cdot I_{Я}(p) + E(p), \quad (3.41)$$

где  $I_{Я}$  – ток цепи якоря двигателя;

$L_{ЯЦ}$  – индуктивность якорной цепи двигателя;

$E$  – ЭДС двигателя;

$$E(p) = C_E \cdot \Phi(p) \cdot \omega_{ДП}(p), \quad (3.42)$$

где  $C_E$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$\Phi$  – магнитный поток обмотки возбуждения;

$$M_{\Pi}(p) = M_{СП}(p) + (J_{0\Pi} + \Delta J_{\Pi}) \cdot p \cdot \omega_{ДП}(p), \quad (3.43)$$

где  $M_{\Pi}$  – электромагнитный момент двигателя привода механизма подачи;

$$M_{\Pi}(p) = C_M \cdot \Phi(p) \cdot I_{Я}(p), \quad (3.44)$$

где  $C_M$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$$U_B(p) = I_B(p) \cdot R_B + L_B \cdot p \cdot I_B(p), \quad (3.45)$$

где  $I_B$  – ток обмотки возбуждения;

$L_B$  – индуктивность обмотки возбуждения;

$$\Phi(p) = B(p) \cdot S_{\Pi}, \quad (3.46)$$

где  $B$  – магнитный поток обмотки возбуждения;

$S_{\Pi}$  – площадь полюса двигателя;

$$B(p) = (\mu_1 + \Delta\mu) \cdot \mu_0 \cdot H(p), \quad (3.47)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля возбуждения;

$$H(p) = I_B(p) \cdot \frac{w_B}{l_B}, \quad (3.48)$$

где  $w_B$  – число витков обмотки возбуждения;

$l_B$  – длина магнитной силовой линии двигателя.

Связь выходной координаты с параметрами двигателя и управляющими воздействием описывается уравнением механической характеристики:

$$\omega_{ДП} = \frac{U_{ПЭЯ}}{C_e \cdot \Phi} - \frac{M_{СП} \cdot R_{ЯЦ}}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi}. \quad (3.49)$$

Динамическая модель механизма привода подачи в виде структурной схемы представлена на рисунке 4.5.

### 3.8.2 Модель момента сопротивления нагрузки двигателя механизма подачи

В электроприводе механизма подачи сопротивление нагрузки  $\Delta M_{СП}$  возникает в результате взаимодействия механизма подачи и процесса резания.

Величина  $\Delta M_{СП}$  возникает в результате действия радиальной составляющей силы резания  $P_y$  (при торцовом точении). Величина  $P_y$  определяется уравнением [83]:

$$P_y = 10 \cdot C_{Py} \cdot t^{x_2} \cdot s^{y_2} \cdot v^{n_2} \cdot K_{Py}, \quad (3.50)$$

где  $C_{Py}$  – коэффициент, учитывающий условия обработки, при определении радиальной составляющей силы резания;

$x_2, y_2, n_2$  – показатели степени при  $t, s, v$  соответственно при определении радиальной составляющей силы резания, определяются по таблицам для конкретных условий обработки;

$K_{Py}$  – поправочный коэффициент, представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания, которые определяются по соответствующим таблицам для расчета радиальной составляющей силы резания:

$$K_{Py} = K_{MPy} \cdot K_{\varphi Py} \cdot K_{\gamma Py} \cdot K_{\lambda Py} \cdot K_{rPy}, \quad (3.51)$$

где  $K_{MPy}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости;

$K_{\varphi Py}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины главного угла в плане резца;

$K_{\gamma Py}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины переднего угла резца;

$K_{\lambda Py}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины угла наклона главного лезвия резца;

$K_{rPy}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние величины радиуса при вершине резца.

С учетом выражения (3.50) величина сопротивления нагрузки электропривода механизма подачи находится по выражению:

$$\Delta M_{СП} = M_{Py} = K_v \cdot 10 \cdot C_{Py} \cdot t^{x_2} \cdot s^{y_2} \cdot v^{n_2} \cdot K_{Py}, \quad (3.52)$$

где  $M_{Py}$  – момент нагрузки двигателя механизма подачи;

$K_y$  – коэффициент передачи вращательного движения в поступательное механизма подачи.

Структурная схема модели связи момента нагрузки двигателя механизма подачи с параметрами режима резания представлена на рисунке 3.11. Структурная схема разработана на основе уравнения (3.50) [83] и представлена в виде уравнения (3.52), учитывает только статическую составляющую момента нагрузки  $M_{Py}$  и силы  $P_y$ . Однако модель (3.52) (рисунок 3.11) не учитывает динамическую составляющую момента сопротивления механизма подачи. Поэтому при составлении окончательной структурной схемы механизма подачи, динамическая составляющая учтена (рисунок 4.5).

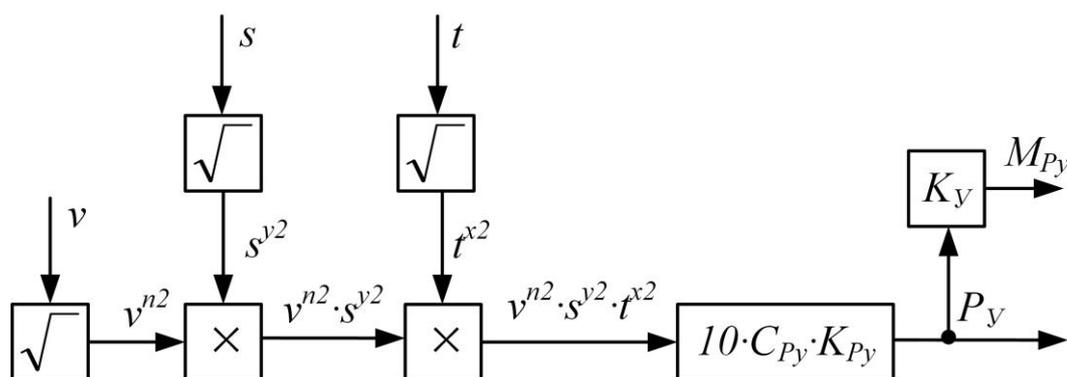


Рисунок 3.11 – Структурная схема связи момента нагрузки двигателя механизма подачи с параметрами резания при торцовом точении

Таким образом, привод механизма подачи подвержен действию возмущений, отклоняющих угловую частоту вращения вала двигателя привода подачи. В результате этого изменяется величина подачи, что вызывает отклонение температуры в зоне резания от заданного значения. Следовательно, для стабилизации величины угловой частоты вращения двигателя привода подачи необходимо создание САР угловой частоты вращения двигателя привода подачи.

### Выводы по главе 3

1. Разработан порядок проведения анализа элементов силовой части канала управления температурой в зоне резания как объектов управления.

2. Элементы силовой части канала управления температурой в зоне резания исследованы как объекты управления.

3. Разработана динамическая модель процесса резания в виде нелинеаризованной структурной схемы, позволяющая установить связь между воздействиями на элементы силовой части канала управления температурой с температурой в зоне резания металла.

4. Разработана структурная схема силовой части канала управления температурой в зоне резания.

5. Разработана модель тангенциальной составляющей силы резания с учетом износа инструмента.

6. Разработана структурная схема механизма подачи, позволяющая произвести моделирование электромеханической системы «электродвигатель подачи – процесс резания» в динамических режимах. В отличие от структурных схем, предлагаемых в учебной и научной литературе, в ней учтена переменность параметров электрической машины и процесса резания.

7. Представленный материал может быть использован инженерами, разрабатывающими замкнутые САУ процессом резания металлов, а также студентами при курсовом и дипломном проектировании.

## **Глава 4. Система автоматического регулирования температуры в зоне резания металла**

### **4.1 Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла**

В параграфе 1.1 обоснована необходимость создания САРТ.

В параграфе 3.1 разработан порядок выбора типа САУ.

При разработке САР прежде всего необходимо определиться с требуемой точностью регулирования.

Согласно параграфу 1.1, высокая эффективность процесса резания (стабилизация параметров качества поверхности детали, минимальный износ режущего инструмента, стабилизация величины энергоемкости процесса резания, предотвращение перегрева инструмента и др.) возможна при поддержании заданной температуры в зоне резания с максимально высокой точностью.

Предлагаемая функциональная схема САРТ представлена на рисунке 4.1.

Согласно главе 3, силовая часть канала управления температурой в зоне резания и канал управления подачей подвержены действию возмущений, несанкционированно отклоняющих выходную координату.

Максимально высокую точность регулирования температуры в зоне резания металла можно получить, если компенсировать действие возмущений. Для этого необходимо в каждом частном случае решить, каким типом САУ необходимо компенсировать действие возмущений.

### **4.2 Компенсация действия возмущений преобразователя энергии привода главного движения**

Преобразователь энергии подвержен возмущению – колебанию напряжения сети в пределах  $\Delta U_C = 30\% \Delta U_{Cmin}$  (параграф 3.4). Наличие такого существенного

возмущения требует его компенсации. Компенсацию возмущения возможно осуществить за счет применения локальной САР напряжения преобразователя энергии. Для этого необходимо предусмотреть датчик ДН постоянного напряжения  $U_d$ , сумматор С1 и регулятор напряжения РН. В этом случае структурная схема САР напряжения  $U_d$  будет иметь следующий вид (рисунок 4.2).

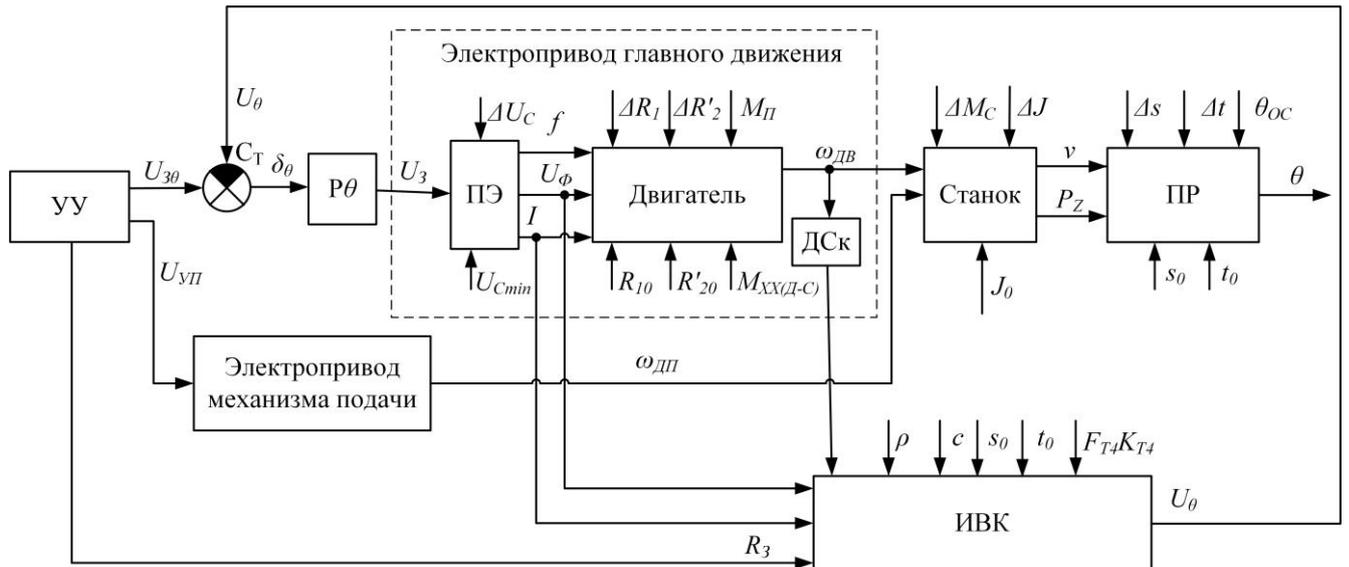


Рисунок 4.1 – Функциональная схема САРТ ( $U_{3\theta}$  – напряжение управления температурой в зоне резания металла;  $U_\theta$  – напряжение, пропорциональное температуре в зоне резания;  $\delta_\theta$  – ошибка регулирования; УУ – устройство управления; Рθ – регулятор температуры в зоне резания; ДСк – датчик скорости вращения вала двигателя привода главного движения; ИВК – измерительно-вычислительный комплекс;  $U_{уп}$  – напряжение управления электропривода механизма подачи; СТ – сумматор)

Функциональная схема САР напряжения ПЭ содержит элемент нелинейности БУ. Для использования схемы при синтезе САР напряжения ПЭ необходимо линеаризовать БУ.

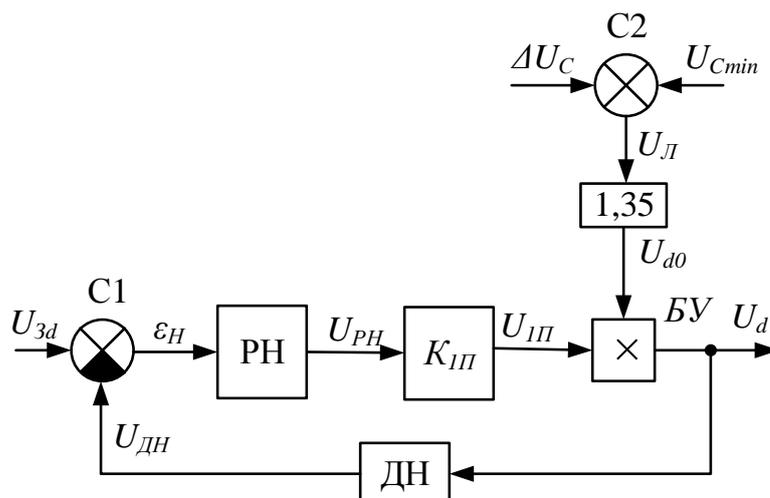


Рисунок 4.2 – Функциональная схема САР напряжения преобразователя энергии привода главного движения ( $U_{3d}$  – напряжение задания выходного напряжения преобразователя энергии;  $\varepsilon_H$  – ошибка регулирования выходного напряжения преобразователя энергии;  $U_{PH}$  – напряжение регулятора напряжения;  $U_{1П}$  – напряжение коэффициента передачи преобразователя энергии;  $U_{дн}$  – выходное напряжение датчика напряжения;  $K_{1П}$  – коэффициент передачи преобразователя энергии; БУ – блок умножения; С2 – сумматор)

#### 4.3 Компенсация возмущений, действующих на систему «электродвигатель привода главного движения – станок»

Возмущениями системы Д-С являются  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R'_2$ ,  $\Delta M_C$ ,  $\Delta J$  (параграф 3.3.1).

Совместное действие возмущений может отклонять выходную координату  $\omega_{дв}$  при номинальной частоте вращения вала на  $\pm 10\%$  номинального значения.

Компенсация действия возмущений может быть осуществлена за счет применения обратной связи по частоте вращения двигателя, т.е. за счет создания САР частоты вращения вала двигателя. Для этого необходимо установить или использовать имеющийся датчик частоты вращения вала двигателя привода главного движения ДСк, например, тахогенератор, использовать сумматор С3 и

регулятор угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения РСк.

Учитывая высокие требования к статической точности регулирования выходной координаты – угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения, целесообразно применить регулятор, построенный на базе интегратора.

САР угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения содержит ряд нелинейных элементов, которые при анализе и синтезе САР необходимо линеаризовать. Функциональная схема САР угловой частоты вращения вала двигателя системы Д-С представлена на рисунке 4.3.

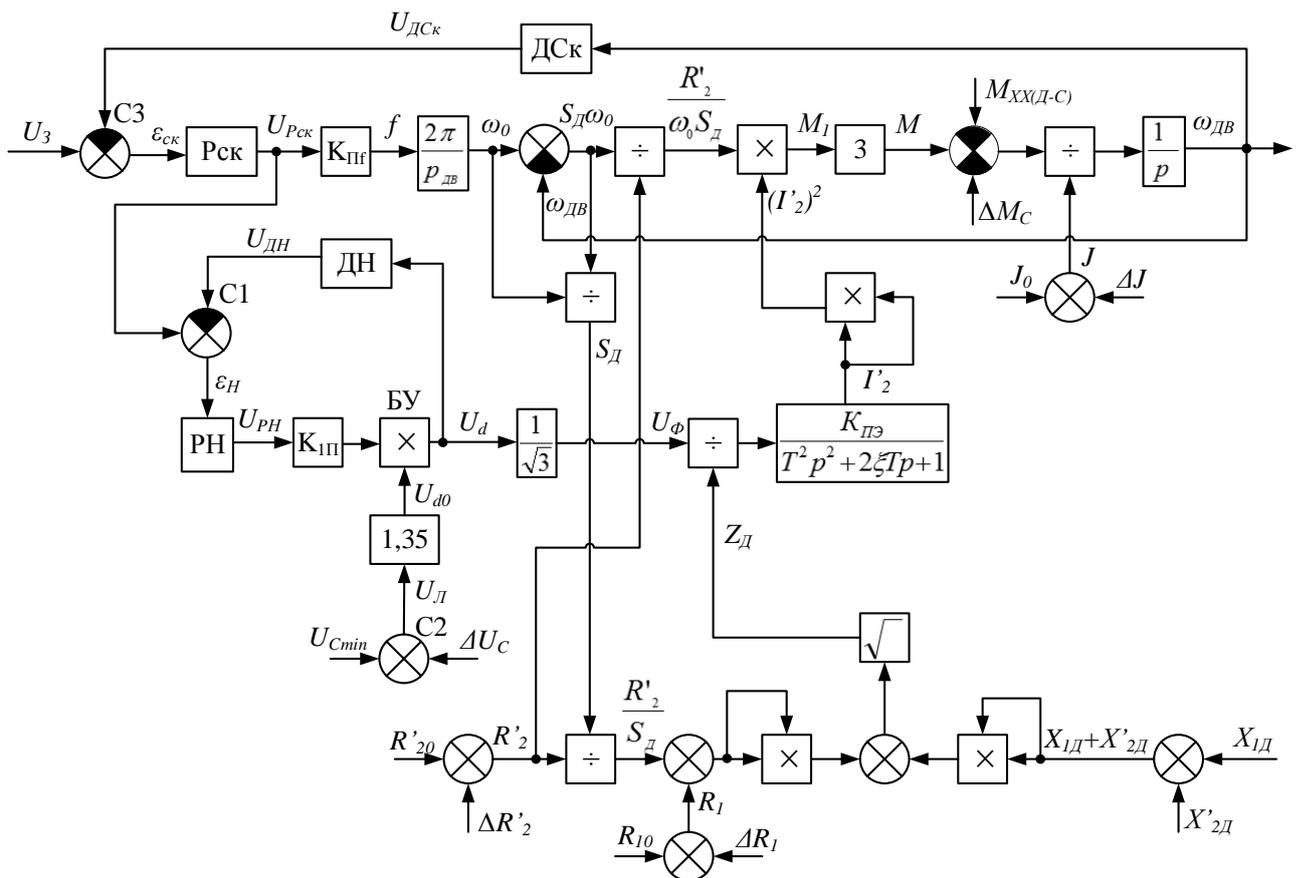


Рисунок 4.3 – Функциональная схема САР угловой частоты вращения вала двигателя системы «электродвигатель привода главного движения – станок»

#### 4.4 Компенсация возмущений, действующих на канал управления подачей

Электропривод механизма подачи построен на базе машины постоянного тока с независимым возбуждением, функциональная схема представлена на рисунке 4.5.

Управление якорной цепью и цепью обмотки возбуждения осуществляется преобразователями постоянного тока, позволяющими изменять напряжение управления.

Для компенсации действия возмущений  $\Delta R_{яц}$  и  $\Delta U_C$  применена отрицательная обратная связь по току якоря. Для стабилизации САР применен регулятор тока якоря РТЯ. РТЯ построен на базе интегратора, обеспечивающего статическую ошибку регулирования с точностью датчика тока якоря ДТЯ.

Для компенсации действия возмущения от момента сопротивления  $M_{py}$  применена отрицательная обратная связь по угловой частоте вращения вала двигателя подачи. Угловая частота вращения вала двигателя подачи измеряется датчиком  $D\omega_{дп}$ . Стабилизация САР угловой частоты вращения вала двигателя подачи осуществляется регулятором частоты вращения вала двигателя подачи  $P\omega_{дп}$ . Регулятор построен также на основе интегратора.

Электропривод подачи может работать в следящем режиме или в режиме позиционирования. Поэтому в нем применена отрицательная обратная связь по положению вала двигателя подачи. Датчиком обратной связи является  $D\varphi_{мп}$ . Регулятором положения вала двигателя является пропорциональное звено  $P\varphi_{мп}$ .

Для компенсации действия возмущения на обмотку возбуждения  $\Delta U_C$  и  $\Delta R_B$  применена отрицательная обратная связь по току возбуждения. Стабилизация САР тока возбуждения осуществляется регулятором тока обмотки возбуждения РТВ. Ток обмотки возбуждения измеряется датчиком ДТВ. Для устранения статической ошибки используется регулятор, построенный на базе интегратора.

Регулирование скорости во второй зоне осуществляется за счет стабилизации ЭДС якоря. Переключение режима регулирования во вторую зону

осуществляется нелинейным элементом НЭ. Стабилизация САР ЭДС якоря осуществляется регулятором РЕ. Регулятор построен на базе интегратора. Величина ЭДС измеряется датчиком ЭДС ДЕ и подается в виде отрицательной обратной связи на сумматор в виде напряжения  $U_{ДЕ}$ .

#### 4.5 Измеритель тангенциальной составляющей силы резания

Тангенциальная составляющая силы резания  $P_Z$  является элементом, формирующим температуру в зоне резания. Величина  $P_Z$  подвержена действию возмущений от изменения глубины резания  $\Delta t$  и подачи  $\Delta s$ . Поэтому необходимо стабилизировать заданное значение силы резания.

Непосредственное измерение величины  $P_Z$  представляет определенные сложности. Поэтому в данной работе величину  $P_Z$  предлагается определять по току привода главного движения [64].

В рассматриваемой САРТ привод главного движения построен на базе трёхфазного асинхронного двигателя с частотным управлением. Пропорционально величине  $P_Z$  изменяется ток электрической машины. Это вытекает из взаимосвязей (3.10), (3.11), (4.1):

$$P_Z = \frac{M_{III}}{R_3},$$

$$M_{III} = M \cdot i,$$

$$M = K_{ДВ} \cdot I_2', \quad (4.1)$$

где  $K_{ДВ}$  – коэффициент связи момента и тока двигателя, определяется по выражению:

$$K_{ДВ} = \frac{M_{НОМ}}{I_{НОМ}}, \quad (4.2)$$

где  $M_{НОМ}$  – номинальное значение момента двигателя;

$I_{НОМ}$  – номинальное значение тока двигателя.

Активная мощность асинхронного двигателя  $P_A$  может быть описана выражениями:

$$P_A = 3 \cdot U_\phi \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi, \quad (4.3)$$

$$P_A = M \cdot \omega_{ДВ}. \quad (4.4)$$

Приравняв левые части уравнений (4.3) и (4.4) получим:

$$M \cdot \omega_{ДВ} = 3U_\phi \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi. \quad (4.5)$$

Из уравнения (4.5) выразим  $M$ :

$$M = \frac{3 \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi}{\omega_{ДВ}} \cdot I'_2. \quad (4.6)$$

Угловая частота вращения вала двигателя определяется по выражению:

$$\omega_{ДВ} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P_{ДВ}}. \quad (4.7)$$

Уравнение (4.6) с учетом выражения (4.7) примет вид:

$$M = \frac{3U_\phi \cdot \cos \varphi}{\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P_{ДВ}}} \cdot I'_2. \quad (4.8)$$

Учитывая, что  $U_\phi/f = U_{\phi H}/f_H = \text{const}$ , а скорость резания  $v$  изменяется в небольших пределах от скорости резания  $v_0$ , соответствующей оптимальной температуре в зоне резания, можно считать, что  $\cos \varphi = \text{const}$ . Поэтому момент двигателя определяется по выражению (4.1), при этом коэффициент связи момента и тока двигателя, определяется по выражению:

$$K_{ДВ} = \frac{3U_\phi \cdot P_{ДВ} \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (4.9)$$

Следовательно, измеряя  $I'_2$ , можно судить о величине  $P_Z$ . С учетом выражений (3.10), (3.11), (4.1), (4.8), тангенциальная составляющая силы резания определяется выражением:

$$P_Z = \frac{M \cdot i}{R_3} = \frac{K_{ДВ} \cdot i \cdot I'_2}{R_3} = \frac{3U_\phi \cdot p_{ДВ} \cdot i \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{I'_2}{R_3}. \quad (4.10)$$

То есть, уравнение (4.10) можно представить в виде:

$$P_Z = \frac{K_{ДМ} \cdot I'_2}{R_3}, \quad (4.11)$$

где  $K_{ДМ}$  – коэффициент передачи измерителя момента двигателя привода главного движения, определяется по выражению:

$$K_{ДМ} = K_{ДВ} \cdot i. \quad (4.12)$$

При моделировании сигнал, пропорциональный величине радиуса резания заготовки  $R_3$  берется из системы ЧПУ. Ток двигателя  $I'_2$  измеряется при помощи датчика тока.

Величина  $P_Z$  имеет две составляющих:  $P_{Z0}$  – сила  $P_Z$  при вновь заточенном резце,  $P_h$  – сила приращения от износа инструмента (параграф 3.5.1).

В данном случае информационным преобразователем измерителя силы резания является электропривод главного движения станка. Функциональная схема измерителя тангенциальной составляющей силы резания представлена на рисунке 4.4.

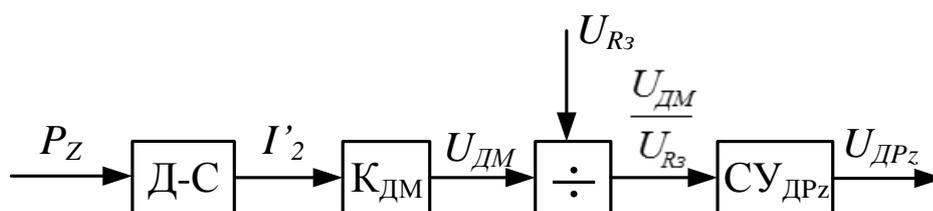


Рисунок 4.4 – Функциональна схема измерителя тангенциальной составляющей силы резания  $P_Z$  ( $U_{DM}$  – напряжение, пропорциональное моменту,  $U_{R3}$  – напряжение, пропорциональное радиусу резания,  $SU_{DPz}$  – согласующее устройство измерителя силы резания,  $U_{DPz}$  – напряжение, пропорциональное величине тангенциальной составляющей силы резания)

#### 4.6 Компенсация возмущений, действующих на процесс резания

Согласно рисунку 4.1 управляющим параметром процесса резания является  $P_{рез}$ . Мощность резания  $P_{рез}$  есть произведение  $(v \cdot P_Z)$ . Величина  $v$  задается приводом главного движения, а величина  $P_Z$  – приводом подачи.

Привод подачи также подвержен действию возмущений, поэтому для компенсации возмущений в нем предусмотрена система автоматического регулирования тангенциальной составляющей силы резания (САР  $P_Z$ ).

САР  $P_Z$  включает в себя неизменяемую часть: электропривод механизма подачи, входящий в канал управления подачей (параграфы 3.8, 4.4) и измеритель тангенциальной составляющей силы резания (параграф 4.5).

Изменяемой частью САР  $P_Z$  является регулятор тангенциальной составляющей силы резания  $PP_Z$ , построенный на основе интегратора.

Функциональная схема САР  $P_Z$  представлена на рисунке 4.5.

На процесс резания принципиально действует величина изменения подачи  $\Delta s$ . Величина  $\Delta s$  минимизирована за счет применения САР угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения. Однако, САР силы резания в заданных пределах может изменять  $\Delta s$ . То есть величина  $\Delta s$  остается возмущением.

Отклонение глубины резания  $\Delta t$  является возмущением для процесса резания. Причинами отклонения глубины резания, согласно параграфу 3.2, могут быть отклонения размера детали в результате предыдущей обработки – бочкообразность, седлообразность, изогнутость оси, конусообразность и др.

Отклонение  $\theta_{OC}$  находится в зависимости от температуры охлаждающей среды.

Для компенсации действия возмущений от неточности регулирования САР угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения, САР напряжения преобразователя энергии, а также  $\Delta s$ ,  $\Delta t$  и  $\theta_{OC}$  целесообразно

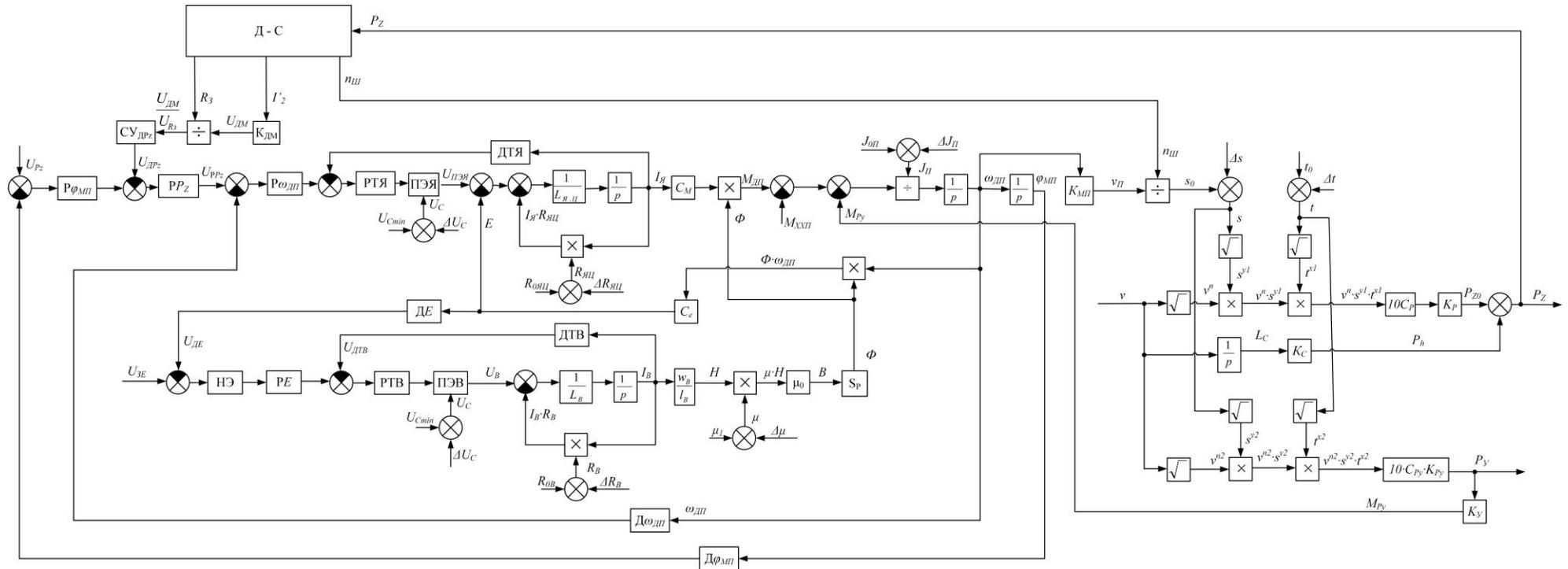


Рисунок 4.5 – Функциональная схема САР тангенциальной составляющей силы резания ( $U_{PPz}$  – напряжение регулятора тангенциальной составляющей силы резания;  $U_{Pz}$  – напряжение, пропорциональное тангенциальной составляющей силы резания;  $K_{МП}$  – коэффициент передачи механизма преобразования угловой частоты вращения вала двигателя механизма подачи в скорость подачи;  $v_{П}$  – скорость подачи;  $n_{Ш}$  – скорость вращения шпинделя;  $U_{ЗЕ}$  – напряжение задания величины ЭДС якоря;  $U_{ДТВ}$  – напряжение датчика тока обмотки возбуждения; ПЭВ – преобразователь энергии обмотки возбуждения; ПЭЯ – преобразователь энергии цепи якоря)

применить САР  $\theta$  температуры в зоне резания, которая включает в себя датчик температуры  $D\theta$ , сумматор  $S_T$  и регулятор температуры  $P\theta$  (рисунок 4.1).

Высокая точность поддержания оптимальной температуры резания в статическом режиме может быть обеспечена астатической САР, так как она не содержит статической ошибки. То есть регулятор  $P\theta$  должен быть одним из интегральных: И (интегральный), ПИ (пропорционально-интегральный) или ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный).

Учитывая, что регулятор  $P\theta$  интегральный, регулирование температуры в зоне резания будет осуществляться с точностью датчика. Произведём анализ точности предлагаемого способа определения температуры в зоне резания.

#### **4.7 Анализ точности регулирования температуры в зоне резания**

Точность регулирования температуры в зоне резания определяется двумя факторами: точностью исполнительной системы и точностью измерителя температуры.

В исполнительную систему входят преобразователи энергии, электрические двигатели, станок, которые подвержены действию возмущений, снижающих точность регулирования. Кроме того, возмущающие воздействия самого процесса резания также снижают точность регулирования.

Для повышения точности исполнительной системы использованы САР промежуточных координат с регуляторами на основе интеграторов, компенсирующие действие возмущений. Это позволяет добиться наивысшей точности в статических режимах управления и регламентировать ошибку регулирования в динамических режимах. То есть, задание режимов работы управляющим устройством (УУ) исполняется с точностью измерительных устройств.

Измеритель температуры построен на основе предлагаемой в данной работе модели процесса резания. В модели процесса резания учтен расход энергии, поступающей в нагреваемое тело и излучаемой им.

В нагреваемое тело поступает не вся мощность, а ее часть. В параграфе 2.1.1 констатируется, что при резании металлов более 99,5% работы резания переходит в тепло. То есть, замеренная электрическая мощность на 0,5% больше мощности, переходящей в тепло. Таким образом, ошибка измерения мощности, переходящей в тепло, составляет 0,5%. Для устранения этой ошибки необходимо из измеренной электрической мощности вычесть 0,5% текущей мощности.

При различных скоростях резания количество тепла, отдаваемого нагреваемым телом в стружку, деталь, инструмент, и другие контактирующие поверхности, не одинаково. Для удобства анализа ориентировочных зависимостей, полученных на основании материалов [15] (рисунок 1.4), представлены в виде графиков (рисунки 4.6, 4.7, 4.8) и аппроксимированы уравнениями (4.13, 4.14, 4.15). Здесь величины составных частей отводимого тепла указаны в процентах от общего количества отводимого тепла.

1. Зависимость количества тепла  $q_3$ , отводимого в тело заготовки, от скорости резания представлена на рисунке 4.6, может быть описана уравнением:

$$q_3 = F_{T1} \cdot K_{T1} \cdot \lambda \cdot d\tau = 0,03 \cdot v + 1,36. \quad (4.13)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R_3^2=0,97$ .

2. Зависимость количества тепла  $q_4$ , отводимого в окружающую среду, от скорости резания представлена на рисунке 4.7, может быть описана уравнением:

$$q_4 = F_{T3} \cdot K_{T3} \cdot \lambda \cdot d\tau = 0,0005 \cdot v^2 - 0,23 \cdot v + 33,53. \quad (4.14)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R_4^2=0,98$ .

3. Зависимость количества тепла  $q_1$ , отводимого в стружку, от скорости резания представлена на рисунке 4.8, может быть описана уравнением:

$$q_1 = F_{T5} \cdot K_{T5} \cdot \lambda \cdot d\tau = -0,0008 \cdot v^2 + 0,299 \cdot v + 53,125. \quad (4.15)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R_1^2=0,98$ .

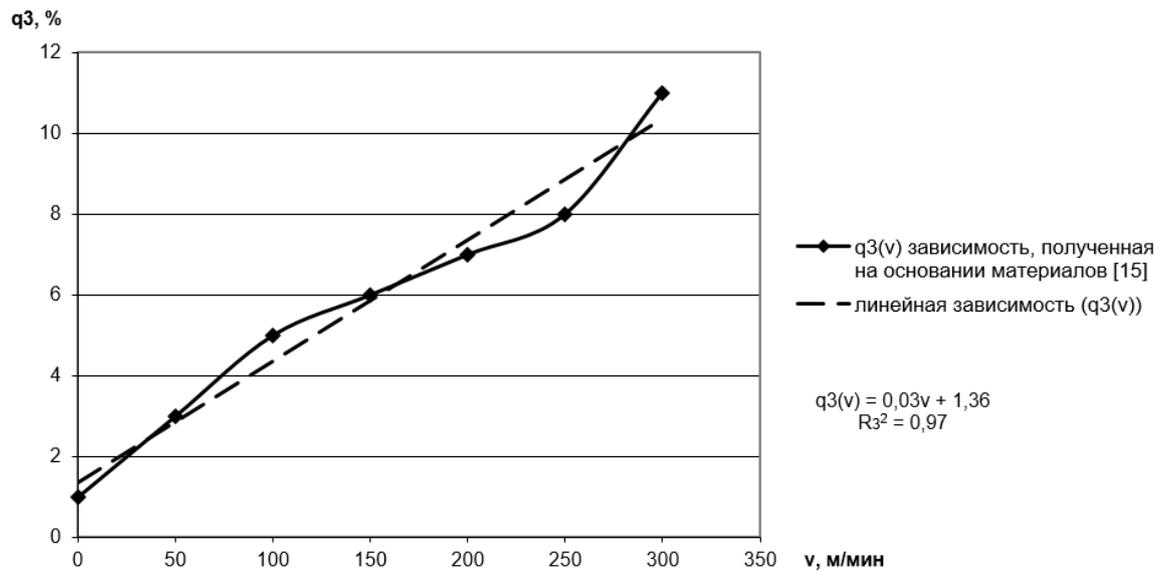


Рисунок 4.6 – Зависимость количества тепла, отводимого в тело заготовки

( $q_3 = F_{T1} \cdot K_{T1} \cdot \lambda \cdot d\tau$ ), от скорости резания  $v$

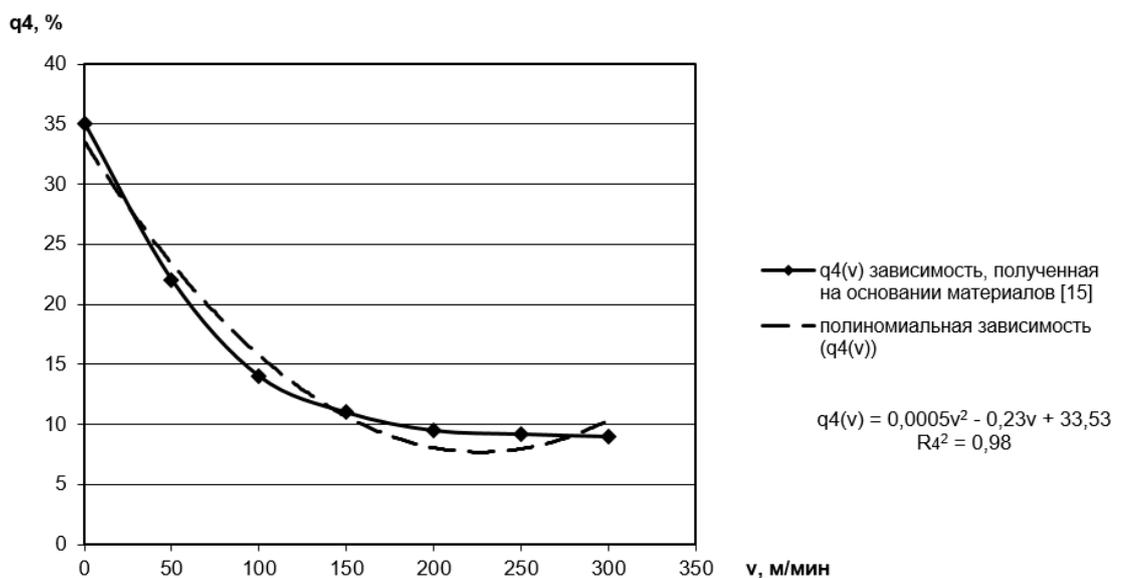


Рисунок 4.7 – Зависимость количества тепла, отводимого в окружающую среду

( $q_4 = F_{T3} \cdot K_{T3} \cdot \lambda \cdot d\tau$ ), от скорости резания  $v$

4. Тепло  $q_2$ , отдаваемое нагреваемым телом в инструмент  $F_{T2} \cdot K_{T2} \cdot \lambda \cdot d\tau$  мало зависит от скорости резания, поэтому по рисунку 1.4 его можно описать зависимостью:

$$q_2 = F_{T2} K_{T2} \cdot \lambda \cdot d\tau = 0,03 \cdot P_{рез} \cdot d\tau. \quad (4.16)$$

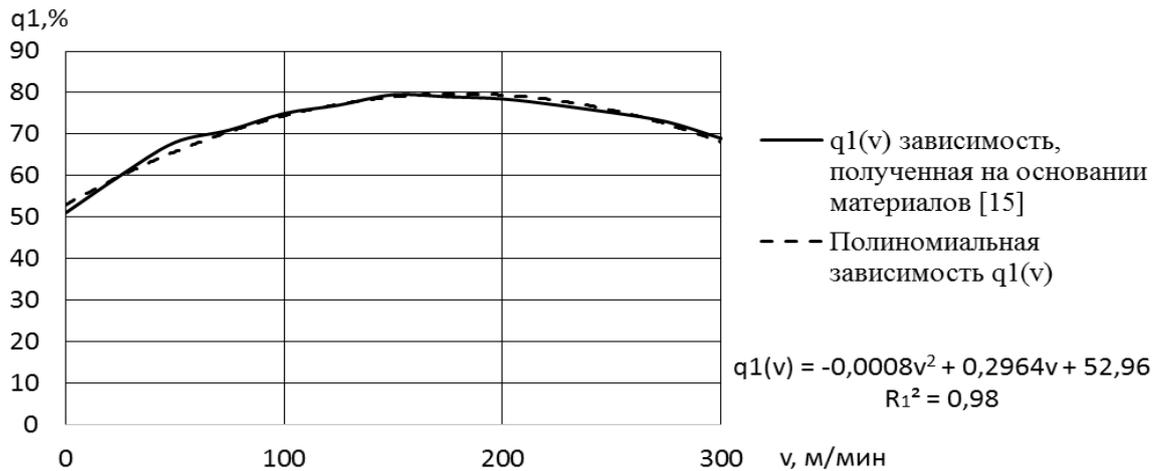


Рисунок 4.8 – Зависимость количества теплоты, отводимого в стружку

( $q_1 = F_{T5} \cdot K_{T5} \cdot \lambda \cdot d\tau$ ), от скорости резания  $v$

5. Тепло, отдаваемое нагреваемым телом в СОЖ  $F_{T4} \cdot K_{T4} \cdot \lambda \cdot d\tau$ , в данном эксперименте не учитывается, так как процесс резания для упрощения понимания процессов, происходящих при резании, исследуется без использования СОЖ. Для исследования влияния СОЖ на процесс резания требуется дополнительная информация.

Суммарная ошибка достоверности аппроксимации кривых составляет 7%, что от общего расхода энергии составляет не более 2,5%.

Кроме того, удельная теплоемкость обрабатываемого материала  $c$  зависит от температуры нагреваемого тела, поэтому удельную теплоемкость следует задавать для каждого значения заданной температуры обрабатываемого материала.

Плотность обрабатываемого материала также зависит от температуры в зоне резания. В модели определяется объем нагреваемого тела. Поэтому необходимо учесть плотность каждого материала, соответствующую заданной температуре в зоне резания.

От правильности назначения данных величин зависит точность поддержания заданной температуры в зоне резания.

Таким образом, учитывая высокую точность реализации заданных значений параметров режима процесса резания исполнительной системой, и считая, что модель процесса нагрева нагреваемого тела выполнена с предположительно высокой точностью, при правильном назначении плотности и удельной теплоемкости обрабатываемого материала, можно считать, что система определения температуры в зоне резания укладывается в пределы инженерной точности не более  $\pm 2,5\%$  заданного значения.

#### 4.8 Модель измерителя температуры в зоне резания

Определение температуры в зоне резания в САПР предлагается осуществлять способом, изложенным в главе 2.

Измерение мощности двигателя позволит достаточно точно судить о температуре в зоне резания.

Модель измерителя температуры в зоне резания металла строится на основании уравнений (2.12) и (3.5) с использованием структурной схемы процесса резания как объекта управления (рисунок 3.5) [66].

На структурной схеме (рисунок 3.5) тепло, отдаваемое нагреваемым телом при разности температур в  $1^\circ\text{C}$ , обозначено  $F_{TK_T}$ , имеет пять составляющих. Величина составляющих зависит от скорости резания. Ориентировочные зависимости получены на основе данных [15]. В параграфе 4.7 эти зависимости представлены в виде уравнений (4.13-4.16).

С учетом уравнений (4.13-4.16) составлены структурные схемы измерителя температуры в зоне резания (рисунки 4.9, 4.10).

Структурные схемы измерителя температуры в зоне резания (рисунки 4.9, 4.10) представляют собой алгоритм вычисления температуры в зоне резания, который программируется в ИВК.

Измерение мощности может, например, производиться методом амперметра и вольтметра или ваттметром.



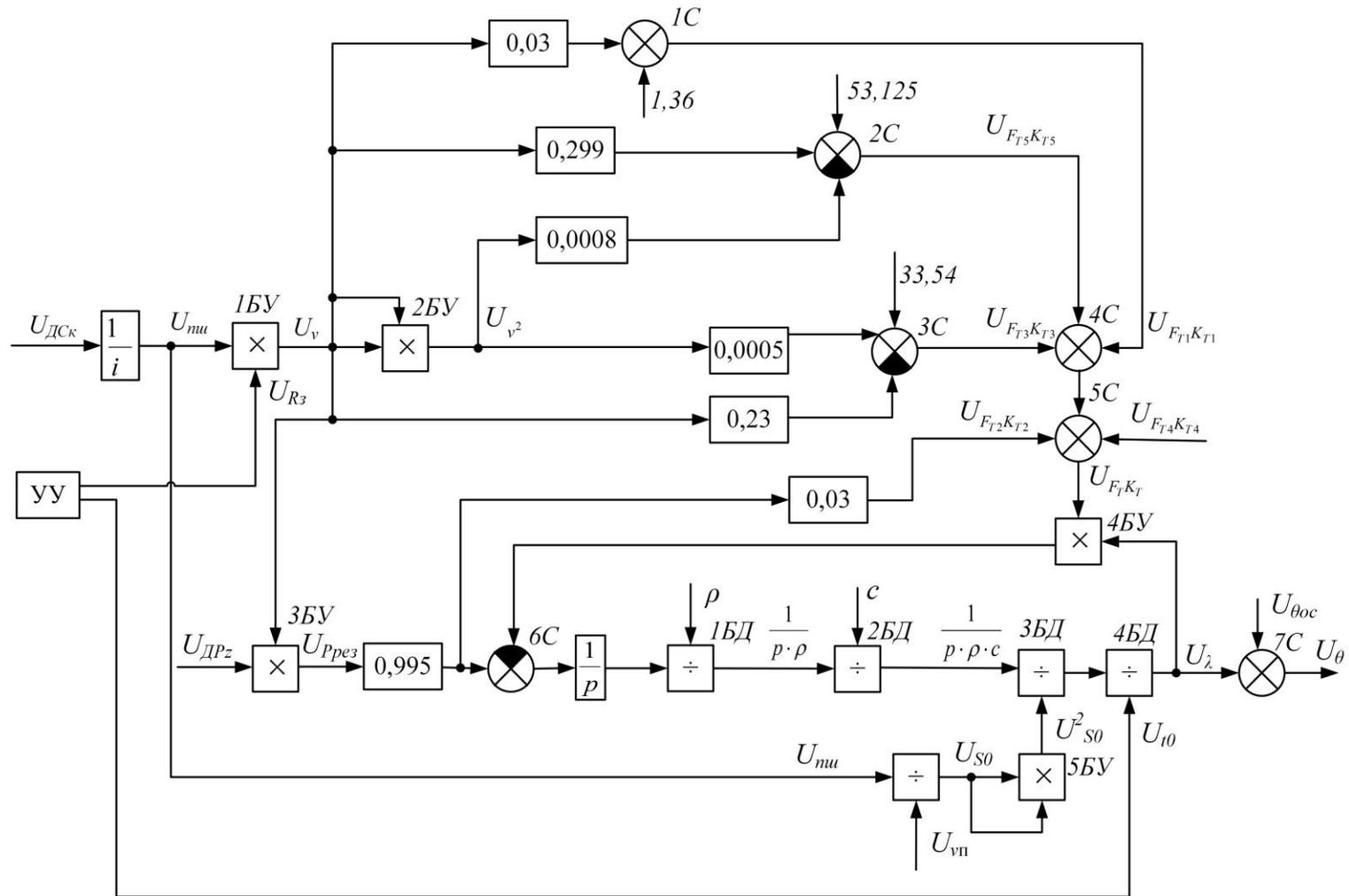


Рисунок 4.10 – Структурная схема модели измерителя температуры на основе измерителя скорости резания и тангенциальной составляющей силы резания (на рисунке обозначены напряжения, пропорциональные соответствующим величинам)

Кроме того, энергия, потребляемая из сети, может измеряться счетчиком электрической энергии.

Информационным преобразователем фазного напряжения является ИП<sub>Н</sub>. Информационным преобразователем измерителя тока является ИП<sub>Т</sub>.

Сигналы с информационных преобразователей перемножаются в блоке умножения ЗБУ (рисунок 4.9). Сигнал с выхода блока ЗБУ преобразуется звеном  $3 \cdot \eta \cdot \cos \varphi$  в напряжение, пропорциональное мощности двигателя  $U_P$ , из которого вычитается мощность холостого хода механической части механизма вращения шпинделя  $U_{P_{xx}}$ . В результате этого появляется напряжение, пропорциональное мощности резания  $U_{P_{рез}}$ , из которого вычитается 0,5% мощности, не расходуемой на процесс резания (согласно параграфу 4.7). Оно поступает на модель процесса превращения мощности резания в температуру в зоне резания, представляющее собой динамическое звено первого порядка с переменными параметрами. Динамическое звено реализует уравнение (2.26), уравнение (2.11) реализуется сумматором 7С.

Однако, учитывая, что  $P_{рез}$  есть произведение  $P_Z$  и  $v$ , то измеритель в зоне резания металла может быть построен по другой схеме (рисунок 4.10).

Произведение  $P_Z$  и  $v$  может быть реализовано блоком умножения ЗБУ (рисунок 4.10), который перемножает напряжение, пропорциональное величине тангенциальной составляющей силы резания  $U_{P_z}$  и напряжение, пропорциональное скорости резания  $U_v$ . Величина  $P_Z$  может быть определена по току привода главного движения станка (параграф 4.5).

#### **4.9 Структурная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла**

Структурная схема САРТ приведена в приложении А. Структурная схема разработана на основе материала глав 3, 4.

Структурная схема содержит нелинейные элементы типа блоков

умножения, деления, функциональных преобразователей. При синтезе и анализе САРТ необходимо произвести линеаризацию нелинейных элементов.

САРТ позволяет стабилизировать заданное значение температуры в зоне резания при управлении по критериям: 1) поддержания оптимальной температуры, обеспечивающей заданные показатели качества поверхности детали; 2) достижения максимальной производительности (метод ВСО); 3) обеспечения заданного значения энергоэффективности.

Управление по этим критериям позволяет повысить эффективность процесса лезвийной обработки металла.

#### **Выводы по главе 4**

1. Канал управления температурой в зоне резания подвержен действию возмущений. Для компенсации возмущений разработаны функциональная и структурная схемы САРТ.

2. Для сокращения диапазона совместного действия всех возмущений разработаны локальные САР, которые компенсируют действие возмущений на отдельные элементы САРТ.

3. Разработана динамическая модель измерителя тангенциальной составляющей силы резания на основе электропривода главного движения, представлена в виде структурной схемы.

4. Разработана динамическая модель измерителя температуры в зоне резания металла, основанная на измерении мощности электрической машины привода главного движения станка, представлена в виде структурной схемы.

5. Для более точного определения температуры нагреваемого тела произведено математическое описание изменения слагаемых теплоты, отводимой от нагреваемого тела, в зависимости от скорости резания, построены графики этих зависимостей.

6. Произведен анализ точности определения температуры в зоне резания.

## **Глава 5. Экспериментальные исследования системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла**

Для проверки работоспособности и качества САРТ проведен эксперимент на имитационной модели [3]. Для этого выполнено логико-математическое описание, разработана структурная схема САРТ и ее элементов. Модель структурной схемы САРТ реализована в лицензионном пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB. В имитационной модели САРТ использованы характеристики реального станка и его оборудования.

### **5.1 Технические характеристики оборудования, используемого в модели системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла**

#### **5.1.1 Технические характеристики токарного станка**

Эксперимент произведен с использованием токарно-винторезного станка 16К20Ф3 [48].

Станок 16К20Ф3 предназначен для токарной обработки в автоматическом режиме наружных и внутренних поверхностей деталей типа тел вращения со ступенчатым и криволинейным профилем различной сложности по заранее составленной управляющей программе. Обработка происходит в один или несколько проходов в замкнутом автоматическом цикле. Установка заготовок осуществляется в патроне, а длинных – в центрах. Область применения станка: мелкосерийное и серийное производство.

#### **Конструкция**

Станок 16К20Ф3 разработан на базе универсального станка и имеет традиционную компоновку. Основание представляет собою монолитную отливку. Станина – коробчатой формы с поперечными ребрами. Направляющие станины

термообработанные, шлифованные. Каретка суппорта с поворотным резцедержателем перемещается по передней призматической и плоской задней направляющим. Задняя бабка так же перемещается по передней плоской и задней призматической направляющим. Автоматическая коробка скоростей сообщает шпиндельной бабке девять скоростей, которые переключаются в цикле обработки за счет включения электромагнитных муфт. Инструмент получает движение подачи от приводов продольных и поперечных подач.

#### Система ЧПУ

Токарный станок 16К20Ф3 оснащается различными системами ЧПУ. Модификации станка в зависимости от комплектации устройством ЧПУ имеют разные индексы (например, 16К20Ф3С32). Контурная система ЧПУ обеспечивает движение формообразования, изменение в цикле обработки значений подач и частот вращения шпинделя, индексацию поворотного резцедержателя, нарезание резьбы по программе. Число одновременно управляемых координат – 2, всего управляемых координат – 2. Дискретность задания поперечных перемещений подачи (по оси X) – 0,005 мм, продольных перемещений (по оси Z) – 0,01 мм.

Технические характеристики токарного станка 16К20Ф3 представлены в таблице 5.1 [48].

Таблица 5.1 – Технические характеристики станка 16К20Ф3

Технические характеристики	Параметры
Диаметр обработки над станиной, мм	500
Диаметр обработки над суппортом, мм	200
Наибольшая длина обработки, 6-позиционная головка, мм	900
Наибольшая длина обработки, 8-позиционная головка, мм	750
Наибольшая длина обработки, 12-позиционная головка, мм	850
Наибольшая длина обработки в центрах, мм	1000
Диаметр цилиндрического отверстия в шпинделе, мм	55
Наибольший поперечный ход суппорта, мм	210

Продолжение таблицы 5.1

Технические характеристики	Параметры
Наибольший продольный ход суппорта, мм	905
Максимальная рекомендуемая скорость продольной рабочей подачи, мм/мин	2000
Максимальная рекомендуемая скорость поперечной рабочей подачи, мм/мин	1000
Количество управляемых координат, шт.	2
Количество одновременно управляемых координат, шт.	2
Дискретность задания перемещения, мм	0,001
Пределы частот вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	20 - 2500
Скорость быстрых перемещений суппорта - поперечного, мм/мин	2 400
Максимальная скорость быстрых продольных перемещений, мм/мин	15000
Максимальная скорость быстрых поперечных перемещений, мм/мин	7500
Количество позиций инструментальной головки	8
Мощность электродвигателя главного движения, кВт	11
Класс точности по ГОСТ 8-82	П
Габаритные размеры станка (Д x Ш x В), мм	3700 × 2260 × 1650
Масса станка, кг	4000

### 5.1.2 Технические характеристики привода главного движения токарного станка

Привод главного движения включает в себя двигатель Русэлком АДЧР160S6 [27] и преобразователь частоты Русэлком RI100-011G [57]. Технические характеристики двигателя представлены в таблице 5.2 и на рисунке 5.1. Технические характеристики преобразователя частоты представлены в таблице 5.3.

#### Технические характеристики двигателя привода главного движения

Таблица 5.2 – Технические характеристики двигателя Русэлком АДЧР160S6 [27]

Тип	Номинальная мощность, кВт	Номинальная скорость, об/мин	Номинальный момент, Н·м	Максимальная скорость, об/мин	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Номинальная частота, Гц	$\cos\varphi$	Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	Включение обмоток Y/Δ	КПД двигателя
АДЧР160S6	11	970	108	3000	23,4	380	50	0,82	0,11	Y	0,87

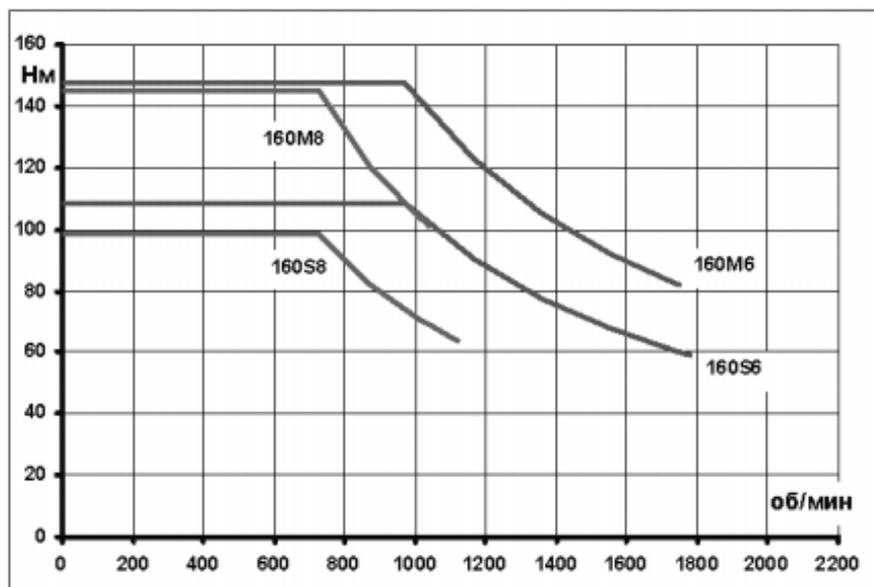


Рисунок 5.1 – Моментные характеристики двигателей АДЧР 160 (приведены для первой и второй зон регулирования) [27]

### Технические характеристики преобразователя частоты привода главного движения

Экономный и высокопроизводительный преобразователь частоты Русэлком RI100 обладает широким набором функций программирования, обеспечивает управление асинхронными электродвигателями с автоматической подстройкой параметров под вращающийся или неподвижный двигатель. Преобразователи частоты монтируются на стенах помещения, в шкафах и имеют возможность фланцевого монтажа [57].

Рекомендуется для применения в станкостроении.

Технические характеристики преобразователя частоты Русэлком RI100-011G:

- мощность: 3Ф~380В – 0,75...15кВт;
- управление скалярное (U/f) и векторное в разомкнутом контуре;
- степень защиты корпуса: IP20;
- перегрузочная способность до 150% (1 мин);
- выходная частота 0...400 Гц;
- встроенный ПИД регулятор;
- автоматическая подстройка параметров под вращающийся или неподвижный электродвигатель;
- точность поддержания скорости вращения  $\pm 0,2\%$ ;
- перезапуск двигателя с отслеживанием вращения;
- встроенный ЭМС фильтр класса С3 (для промышленности);
- встроенный тормозной прерыватель;
- входы: 5 дискретных многофункциональных (в том числе один высокоскоростной HDI), 2 аналоговых;
- выходы: 2 релейных (с общим контактом), 2 аналоговых;
- все выходы/входы свободно программируемые;
- интерфейс RS-485, Modbus RTU в базовой комплектации;
- русскоязычная съемная панель управления с возможностью выноса от 2 до 10 метров при помощи удлинительного кабеля (опция);
- фланцевый монтаж (опция);
- охлаждение: принудительное воздушное с вентилятором;
- более 30 функций защиты электродвигателя.

Таблица 5.3 – Технические характеристики преобразователя частоты Русэлком RI100-011G [57]

Модель	Выходная мощность, кВт	Номинальный входной ток, А	Номинальный выходной ток, А	Масса, кг
RI100-011G	11	32	25	5,58

### 5.1.3 Технические характеристики привода подачи

Электропривод подачи включает в себя двигатель с тахогенератором 4ПБМ132МГО4 [93] и преобразователь энергии ЭПУ1М-2-3447Д УХЛ4 [96]. Технические характеристики двигателя привода подачи и преобразователя энергии представлены в таблицах 5.4 и 5.5 соответственно.

#### Технические характеристики двигателя привода подачи

Таблица 5.4 – Технические характеристики двигателя 4ПБМ132МГО4 [93]

Электродвигатель постоянного тока серии 4ПБМ закрытого исполнения с естественным охлаждением				
Тип	Мощность, кВт	Напряжение якоря, В	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	
			Номинальное значение	Максимальное значение
4ПБМ132МГО4	1,6	440	1060	2500

Номинальный ток двигателя привода подачи рассчитывается по уравнению;

$$I_{Яном} = \frac{P_{Пном}}{U_{Яном}} = \frac{1600Вт}{440В} = 3,63А, \quad (5.1)$$

где  $I_{Яном}$  – номинальный ток якоря;

$P_{Пном}$  – номинальная мощность двигателя привода подачи;

$U_{Яном}$  – номинальное напряжение якоря.

#### Технические характеристики преобразователя энергии привода подачи

Преобразователь энергии привода подачи ЭПУ1М-2-3447Д УХЛ4 [96].

Таблица 5.5 – Технические характеристики преобразователя энергии [96]

Тип преобразователя	Исполнение	Ток, А	Размеры, мм			Масса, кг
			Ширина	Высота	Глубина	
ЭПУ1М-2-3447Д УХЛ4	Д	25	163	290	245	7

## 5.2 Исследование характеристик звеньев структурной схемы системы автоматического регулирования температуры в зоне резания

### 5.2.1 Исследование характеристик процесса резания при торцовом точении

#### Исходные данные исследования процесса резания

Процесс резания при торцовом точении исследуется для пары материалов резец-деталь ВК6М-ХН77ТЮР. Оптимальная температура для этой пары составляет  $\theta_0=700^\circ\text{C}$  [42], температура окружающей среды  $\theta_{0c}=20^\circ\text{C}$  (процесс резания производится без использования СОЖ), при этом разность температур  $\lambda=680^\circ\text{C}$ . Это соответствует тангенциальной составляющей силы резания  $P_{Z0}=1812\text{Н}$  и мощности резания  $P_{Pез}=684\text{Вт}$  (при  $v_0=22,64\text{м/мин}$ ,  $s=0,21\text{мм/об}$ ,  $t=1\text{мм}$ ). Параметры материала заготовки: плотность  $\rho=0,008\text{г/мм}^3$ , удельная теплоемкость  $c=0,495\text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ . Параметры геометрии резца [42]: передний угол  $\gamma=0^\circ$ , угол в плане  $\varphi_P=45^\circ$ , задний угол  $\alpha=10^\circ$  (резание осуществляется вновь заточенным резцом).

$F_{Т4}\cdot K_{Т4}\cdot\lambda\cdot d\tau=0$ , так как в эксперименте [42] резание произведено без использования СОЖ.

#### 5.2.1.1 Модель процесса резания

Исследование работоспособности модели процесса резания производим методом сравнения результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными, полученными А. Д. Макаровым [42] при одинаковых условиях.

На рисунке 5.2 приведена имитационная модель процесса резания, разработанная в пакете SIMULINK MATLAB на основе структурной схемы процесса резания (рисунок 3.5).



### 5.2.1.2 Статические характеристики процесса резания

Статические характеристики зависимости температуры в зоне резания от скорости резания  $\theta=f(v)$  (регулируемые характеристики) исследуются на модели процесса резания (рисунок 5.2).

Управляющим параметром модели процесса резания является скорость резания  $v$ . Глубина резания  $t$  является величиной постоянной. Исследование влияния скорости на величину температуры в зоне резания осуществляется при различной величине подачи  $s = 0,084; 0,21; 0,3$  мм/об.

При исследовании регулировочных характеристик модели процесса резания расчетным путем установлена связь изменения  $F_T K_T$  с подачей  $s$ :  $F_T K_T = f(s)$ , которая представлена на графике (рисунок 5.3). Зависимость аппроксимирована уравнением (5.2), величина достоверности аппроксимации которого составляет  $R^2=1$ :

$$K_{F_T K_T} = -0,042s^2 + 0,0397s + 0,0028, \quad (5.2)$$

где  $K_{F_T K_T}$  – коэффициент связи  $F_T K_T$  с подачей  $s$ .

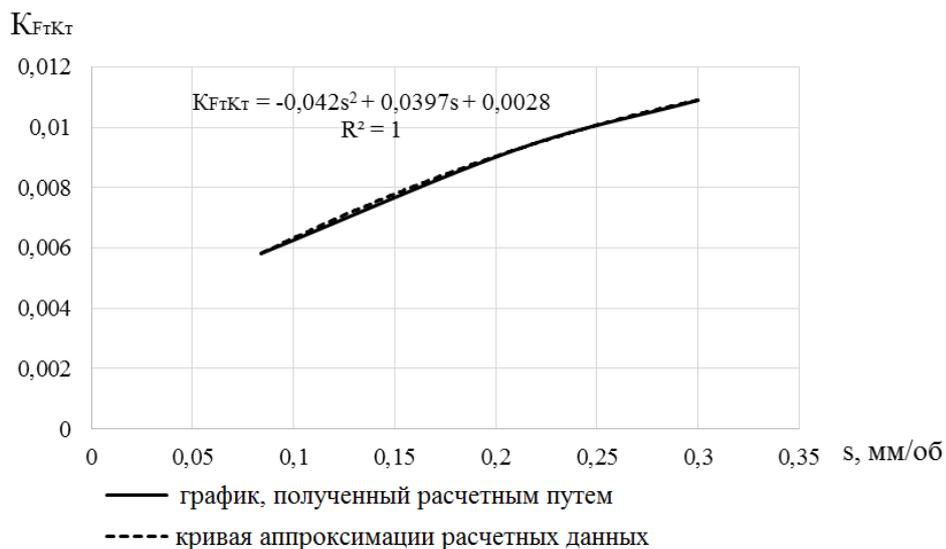


Рисунок 5.3 – Зависимость коэффициента  $K_{F_T K_T}$  от подачи  $s$

Для установления идентичности регулировочных характеристик модели процесса резания с реальными регулировочными характеристиками, полученными в результате исследований процесса резания металла на реальной технологической установке, использованы регулировочные характеристики  $\theta=f(v)$ , взятые из литературы [42] (рисунок 5.4).

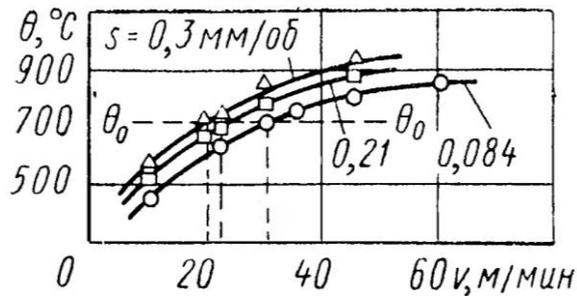


Рисунок 5.4 – Влияние скорости резания на температуру в зоне резания при торцовом точении деталей из жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцом из сплава ВК6М (при  $v=const$  в пределах одного хода):  $t=1\text{мм}$ ;  $\gamma=0^\circ$ ;  $\alpha=10^\circ$ ;  $\varphi=45^\circ$

Для проверки работоспособности модели процесса резания проведен вычислительный эксперимент по построению регулировочных характеристик зависимости  $\theta=f(v)$  при условиях выполненных исследований [42]. Сравнение этих характеристик произведено при различных значениях подачи. Для этого регулировочные характеристики модели и натурального эксперимента приведены к одному масштабу и представлены на рисунках 5.5, 5.6, 5.7.

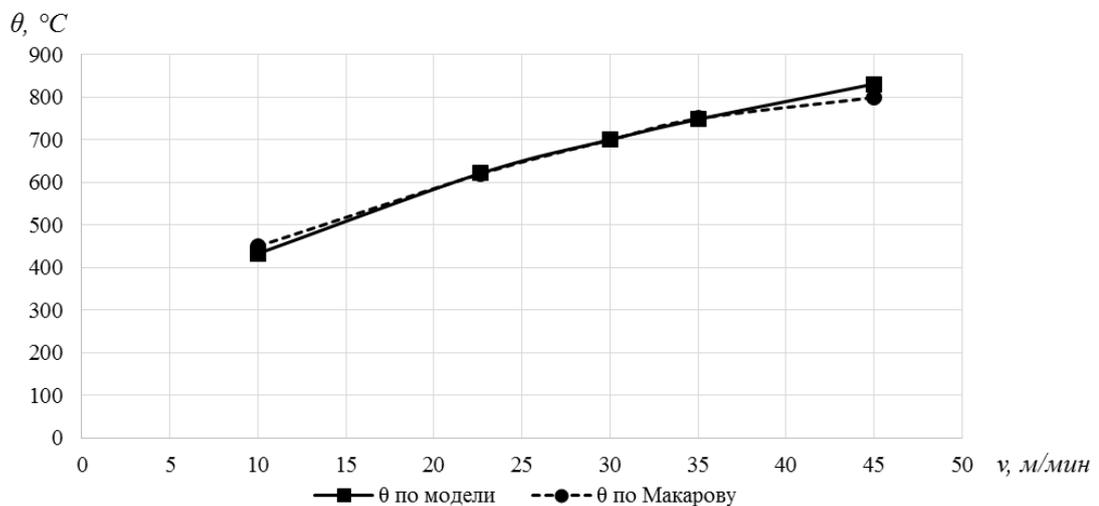


Рисунок 5.5 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(v)$  при  $s=0,084\text{мм/об}$ ,  $t=1\text{мм}$

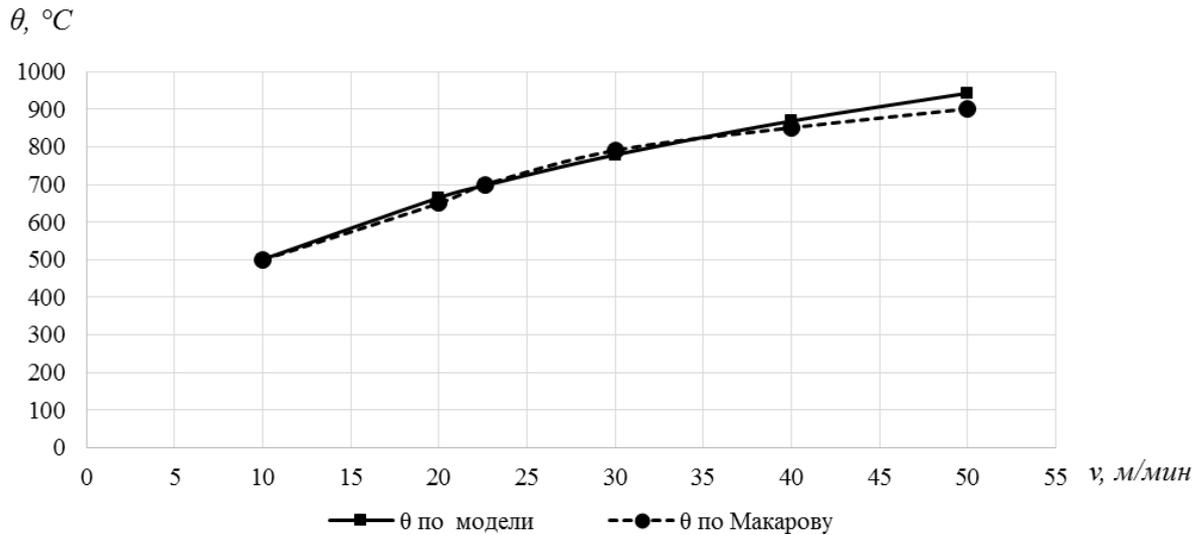


Рисунок 5.6 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(v)$  при  $s=0,21$  мм/об,  $t=1$  мм

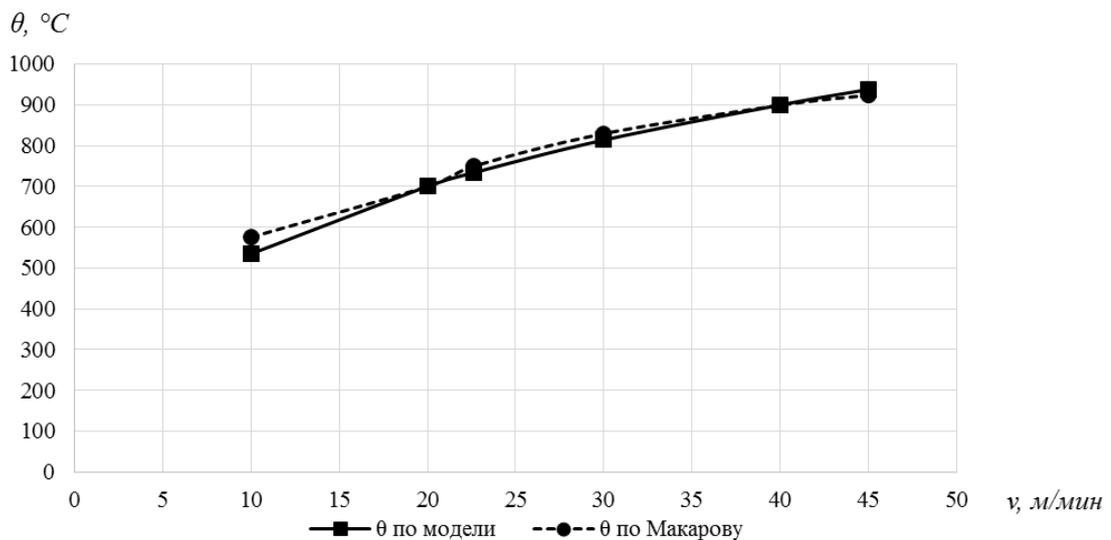


Рисунок 5.7 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(v)$  при  $s=0,3$  мм/об,  $t=1$  мм

В результате анализа рисунков 5.4 – 5.7, можно сделать следующие выводы.

1. Проведен вычислительный эксперимент по определению регулировочных характеристик зависимости температуры в зоне резания от скорости резания на предлагаемой имитационной модели процесса резания при торцовом точении для пары материалов ХН77ТЮР-ВК6М при глубине резания  $t = 1$  мм и подачах  $s = 0,084; 0,21; 0,3$  мм/об при изменении скорости резания в пределах  $v=10$ – $50$  м/мин.

2. Произведено сравнение результатов, полученных на имитационной модели процесса резания, с результатами экспериментов, проведенных А. Д. Макаровым [42]. Визуальное сопоставление полученных графиков зависимости температуры в зоне резания от скорости резания при торцовом точении при различных значениях подачи указывает на их качественное сходство.

3. Разработанная в диссертации модель процесса резания адекватна реальному процессу резания, так как закономерности изменения температуры при различных значениях подачи, полученные в результате вычислительного эксперимента, соответствуют закономерностям, полученным при натурных исследованиях [42].

### 5.2.1.3 Динамические характеристики процесса резания

Разновидностей представления динамических характеристик в теории автоматического управления несколько: временные характеристики; частотные характеристики и другие. Наиболее наглядными являются временные характеристики – это переходные процессы выходной координаты при типовом управляющем воздействии в виде единичного скачка (переходные функции).

В работе исследуются динамические характеристики зависимости температуры в зоне резания от параметров процесса резания  $\theta=f(v, s, t, c \cdot \rho)$  на имитационной модели процесса резания (рисунок 5.2).

В результате исследования получены графики переходных функций изменения температуры в зоне резания при скачкообразном изменении (единичном скачке) управляющего воздействия и возмущений (рисунки 5.8-5.11).

1. Графики переходных функций температуры в зоне резания по управляющему воздействию  $\Delta v$  (рисунок 5.8).

Согласно структурной схеме процесса резания (рисунок 3.5) и графикам переходных функций температуры в зоне резания, полученных на имитационной модели для проведенного в диссертационной работе вычислительного

эксперимента, можно считать, что кривые переходных функций по управляющему воздействию представляют собой экспоненты, постоянные времени которых составляют  $T=0,000173$  с.

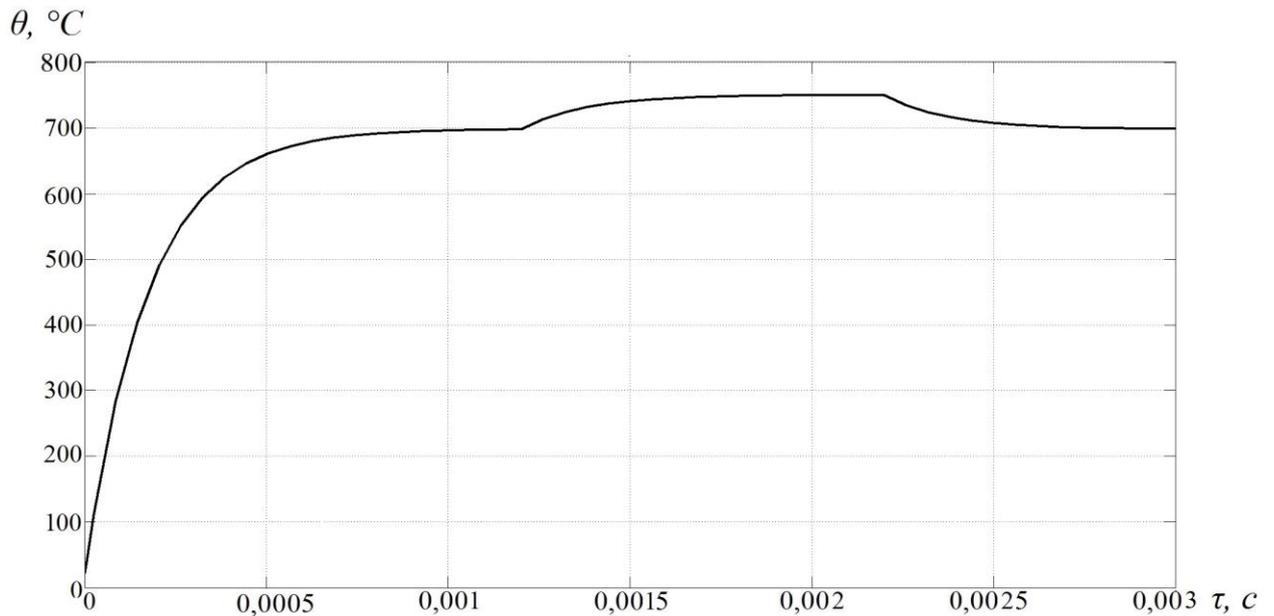


Рисунок 5.8 – Переходные функции температуры в зоне резания по управляющему воздействию  $v$ : увеличение скорости резания от 0 до  $v_0$  на 0,0 с; увеличение скорости резания от  $v_0$  до  $1,2v_0$  на 0,0012с; уменьшение скорости резания от  $1,2v_0$  до  $v_0$  на 0,0022с

2. Графики переходных функций температуры в зоне резания по возмущающему воздействию  $\Delta s$  (рисунок 5.9).

При уменьшении и при увеличении заданного значения  $s$  на величину  $\Delta s$  графики переходных функций температуры в зоне резания можно считать экспоненциальными. Постоянная времени экспоненты составляет  $T=0,000173$ с.

3. Графики переходных функций температуры в зоне резания по возмущающему воздействию  $\Delta t$  (рисунок 5.10).

При уменьшении и при увеличении заданного значения  $t$  на величину  $\Delta t$  графики переходных функций температуры в зоне резания можно считать экспоненциальными. Постоянная времени экспоненты составляет  $T=0,000173$ с.

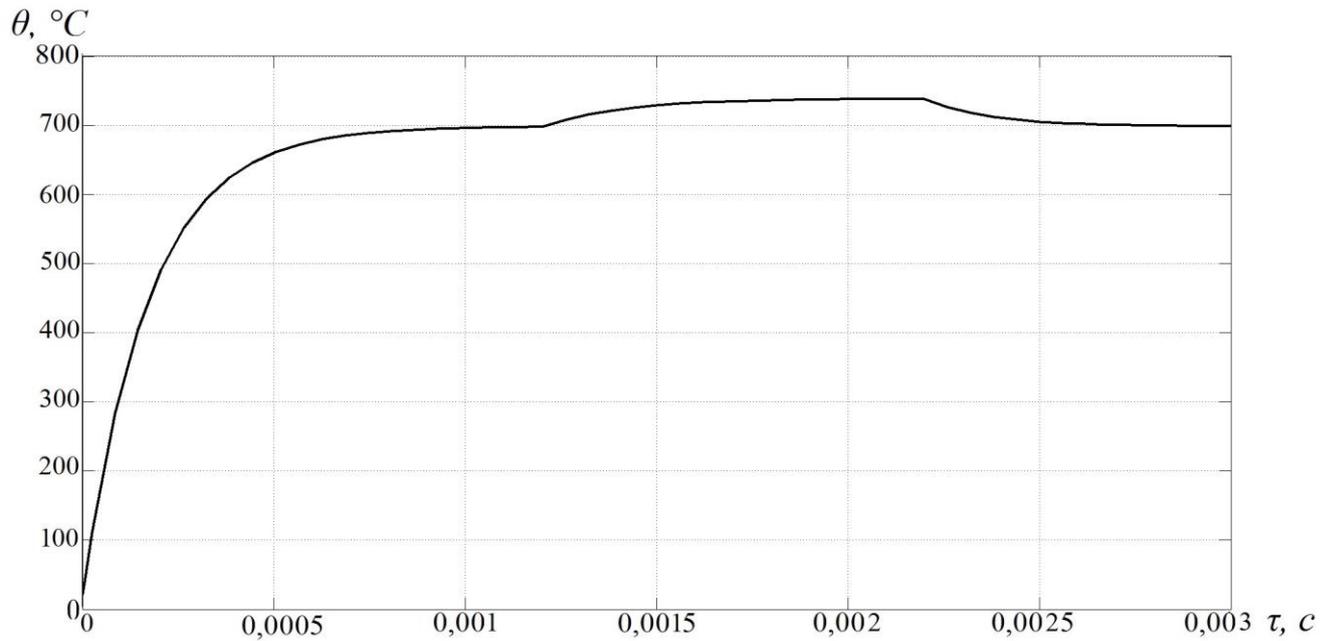


Рисунок 5.9 – Переходные функции температуры в зоне резания при изменении возмущения  $\Delta s$ : увеличение подачи от  $s_0$  до  $1,1s_0$  на  $0,0012$ с; уменьшение подачи от  $1,1s_0$  до  $s_0$  на  $0,0022$ с

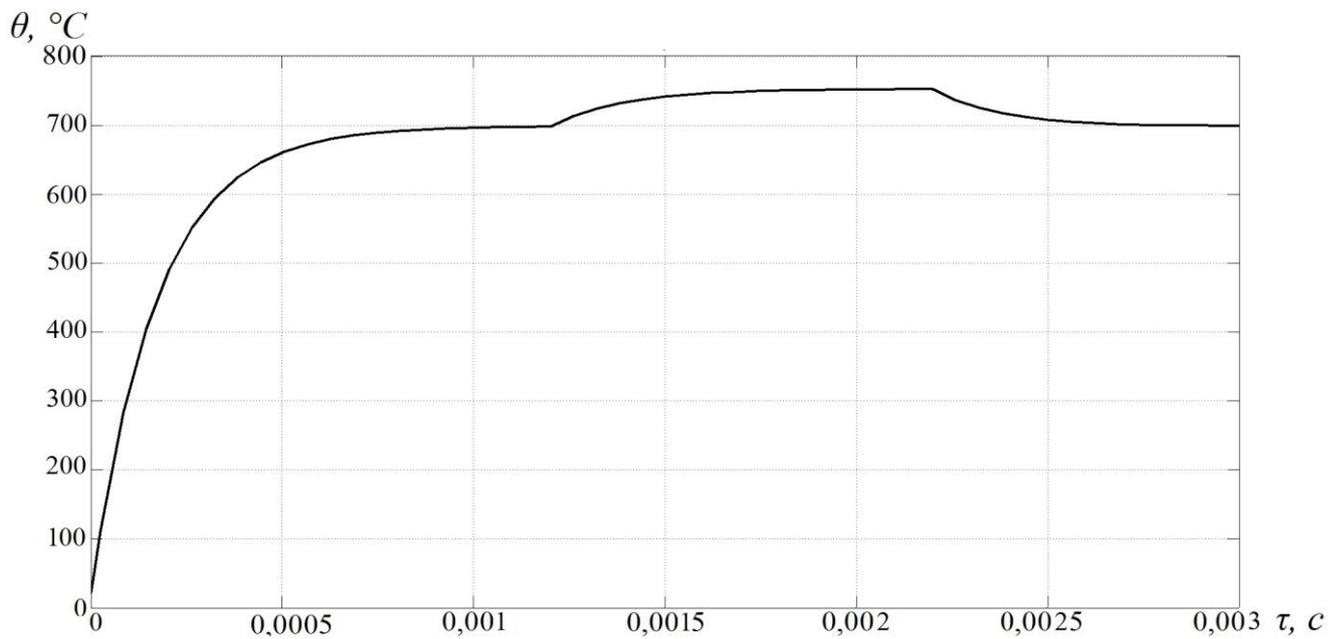


Рисунок 5.10 – Переходные функции температуры в зоне резания при изменении возмущения  $\Delta t$ : увеличение глубины резания от  $t_0$  до  $1,1t_0$  на  $0,0012$ с; уменьшение глубины резания от  $1,1t_0$  до  $t_0$  на  $0,0022$ с

4. Графики переходных функций температуры в зоне резания при изменении ( $c \cdot \rho$ ) (рисунок 5.11).

При точении различных материалов удельная теплоемкость  $c$  и плотность  $\rho$  металла могут изменяться. В результате этого динамика нагрева нагреваемого тела может также изменяться. На графике рисунка 5.11 представлены кривые изменения температуры в зоне резания при увеличении и уменьшении управляющего воздействия при  $c \cdot \rho$ , уменьшенном в 2 раза. Постоянная времени  $T$  нагрева при этом увеличивается в 2 раза:  $T=0,000345\text{с}$ .

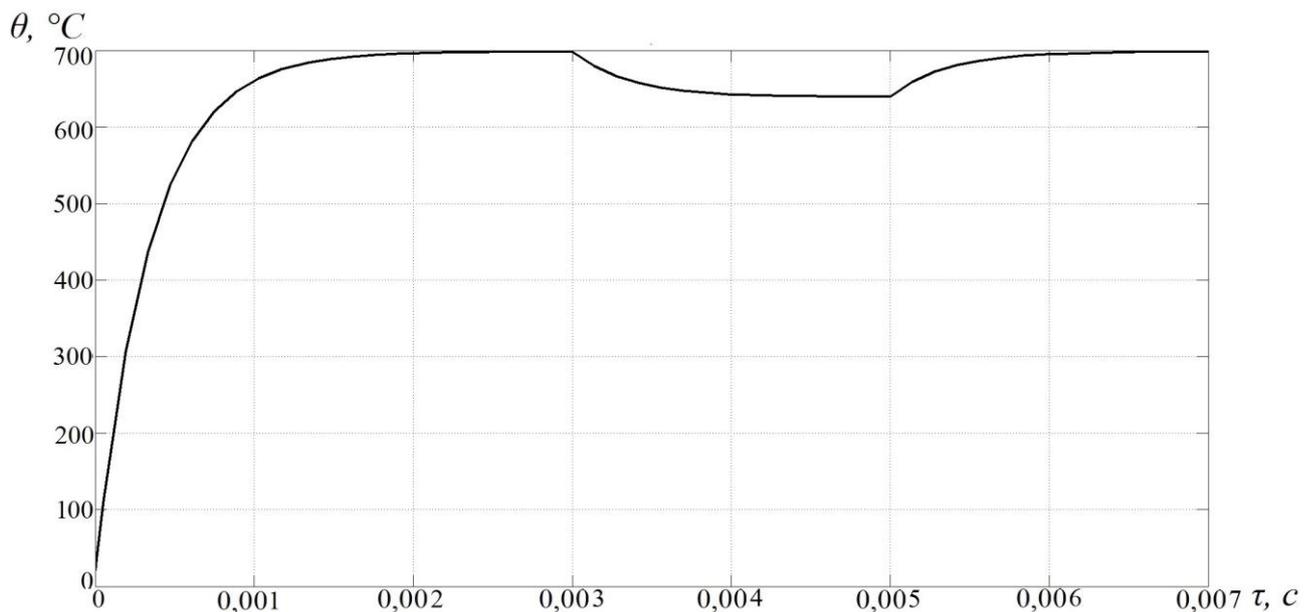


Рисунок 5.11 – Переходные функции температуры в зоне резания при изменении управляющего воздействия при уменьшенном в 2 раза ( $c \cdot \rho$ ): изменение скорости от 0 до  $v_0$  на 0,0 с; уменьшение скорости от  $v_0$  до  $0,8v_0$  на 0,005с; увеличение скорости от  $0,8v_0$  до  $v_0$  на 0,01с

Таким образом, процесс нагрева зоны резания является инерционным. Кривая изменения температуры в зоне резания при скачкообразном изменении управляющего воздействия и всех возмущений представляет собой экспоненту.

#### 5.2.1.4 Особенности регулировочных характеристик процесса резания

В соответствии с параграфом 5.2.1.2 регулировочные характеристики зависимости температуры в зоне резания от скорости резания имеют нелинейный характер.

В существующей литературе, например [42, 74], нет объяснения с точки зрения физических явлений, почему зависимость (2.17) температуры резания от скорости резания имеет нелинейный характер. Автором диссертации предполагается, что нелинейность этой зависимости объясняется следующим [65].

При представлении процесса резания уравнением (2.10), установлено, что объём нагреваемого тела не зависит от скорости резания (2.20), а время выхода нагреваемого тела из зоны действия тангенциальной составляющей силы резания зависит от скорости резания (2.22). Это объясняет факт зависимости температуры нагреваемого тела от скорости резания. Процесс нагрева нагреваемого тела происходит по экспоненциальному закону (рисунок 5.12). При одном и том же объеме нагреваемого тела, но при разной скорости резания мощность, поступающая в зону резания  $P_{рез}$ , различна. Нагреваемое тело при этом нагревается до различных значений установившейся температуры.

При скорости  $v_1$  меньше оптимальной  $v_0$  (кривая 1) мощность, поступающая в зону резания меньше мощности, обеспечивающей оптимальную температуру резания. При этом нагреваемое тело успеет нагреться до установившегося значения температуры  $\theta_{1уст}$ , что соответствует температуре в зоне резания  $\theta_{1сз}$ , достигаемой за время  $\tau_{сз}$  (рисунок 2.1) прохождения нагреваемым телом зоны действия тангенциальной составляющей силы резания. Установившееся значение температуры  $\theta_{1уст}$  меньше оптимального значения  $\theta_{0уст}$ .

При скорости  $v_2$  установившееся значение температуры  $\theta_{2уст}$  составило бы  $943^\circ\text{C}$  (рисунок 5.12). А за время  $\tau_{сз}$  прохождения нагреваемым телом зоны действия тангенциальной составляющей силы резания температура нагреваемого тела достигнет лишь значения  $\theta_{2сз}=755^\circ\text{C}$ .

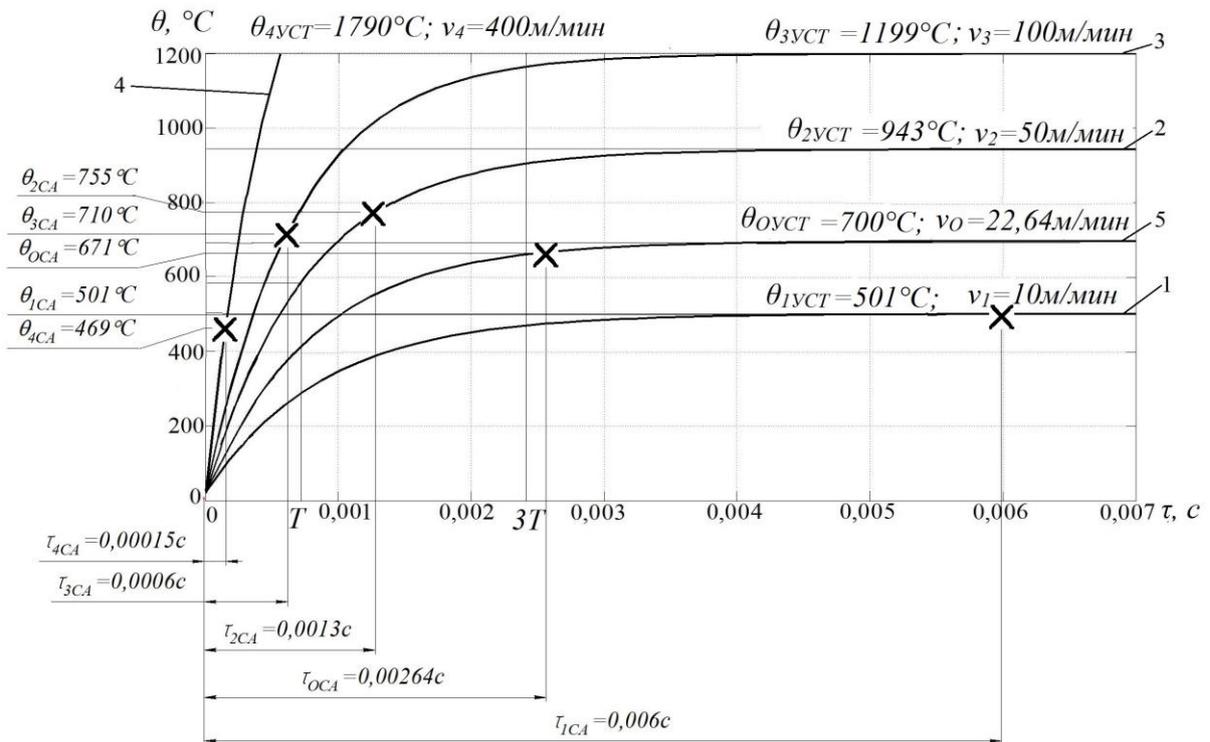


Рисунок 5.12 – Графики переходных функций температуры в зоне резания при различных скоростях резания при  $s=0,21$  мм/об,  $t=1$  мм

При скорости  $v_3$  установившееся значение температуры  $\theta_{3уст}$  составило бы  $1199^\circ\text{C}$  (рисунок 5.12). А за время  $\tau_{сА}$  прохождения нагреваемым телом зоны действия тангенциальной составляющей силы резания температура нагреваемого тела достигнет значения  $\theta_{3сА}=710^\circ\text{C}$ .

При скорости  $v_4$  установившееся значение температуры  $\theta_{4уст}$  составило бы  $1790^\circ\text{C}$  (рисунок 5.12). А за время  $\tau_{сА}$  прохождения нагреваемым телом зоны действия тангенциальной составляющей силы резания температура нагреваемого тела достигнет значения  $\theta_{4сА}=671^\circ\text{C}$ .

Согласно представленным исследованиям, проведенным на имитационной модели процесса резания, можно сделать вывод, что температура нагреваемого тела при уменьшении скорости резания ниже оптимальной снижается, а при

увеличении скорости выше оптимальной температура вначале растет непропорционально скорости резания, а затем снижается.

Это явление можно объяснить особенностями переходных функций изменения температуры нагреваемого тела и временем прохождения нагреваемым телом зоны действия тангенциальной составляющей силы резания.

Для подтверждения представленных в данном параграфе объяснений нелинейности зависимости изменения температуры в зоне резания от скорости резания произведем сравнение этой зависимости, полученной на имитационной модели, с графиком зависимости температуры в зоне резания от скорости резания, полученным в [42] на реальном оборудовании (рисунок 5.13).

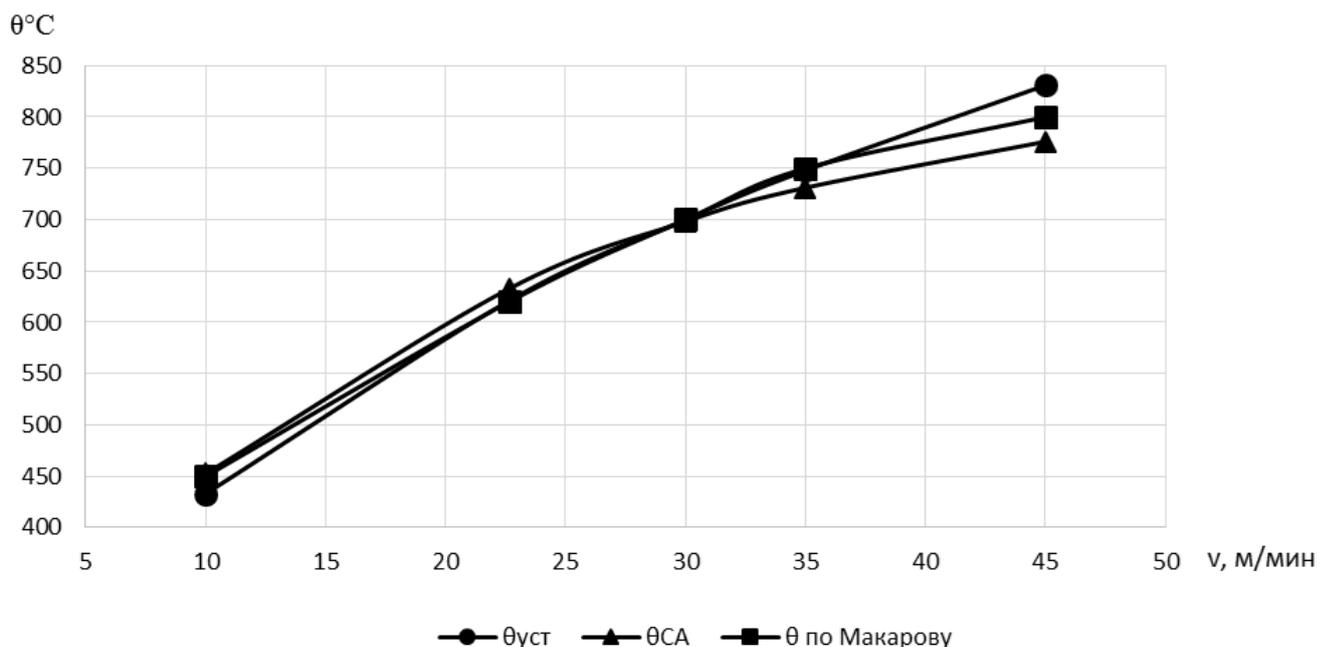


Рисунок 5.13 – Сравнительные графики зависимости температуры в зоне резания от скорости резания при  $s=0,084$  мм/об,  $t=1$  мм

По рисунку 5.13 можно сделать вывод, что характер полученных графиков зависимости температуры в зоне резания от скорости резания, полученных на имитационной модели и на реальном оборудовании, имеют несущественное различие.

На модели произведено исследование изменения установившегося значения температуры и температуры в зоне резания, достигаемой за время выхода нагреваемого тела из зоны действия тангенциальной составляющей силы резания в более широком диапазоне изменения скоростей (10-100м/мин) (рисунок 5.14).

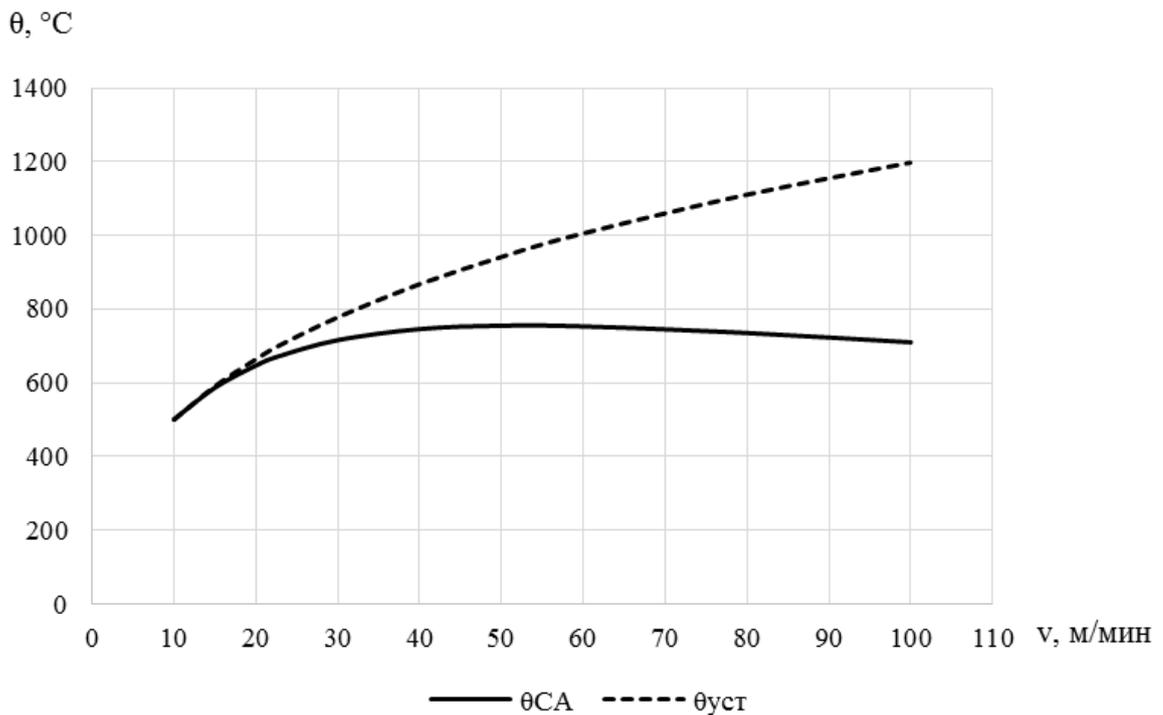


Рисунок 5.14 – Зависимость температуры в зоне резания  $\theta_{СА}$  и установившейся температуры  $\theta_{уст}$  от скорости резания, полученная на модели процесса резания при  $s=0,21$ мм/об,  $t=1$ мм

По графикам (рисунок 5.14) можно сделать вывод, что при увеличении скорости температура в зоне резания снижается после некоторого максимального значения. Этим можно объяснить целесообразность применения высокоскоростного резания.

### 5.2.1.5 Об энергоэффективности процесса лезвийной обработки

Президентом Российской Федерации энергосбережение отнесено к стратегическим задачам государства. Принят Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Указ Президента РФ, постановления Правительства РФ содержат требования и нормы, направленные на повышение энергоэффективности российской экономики. В связи с этим изучены существующие методы и показатели определения энергоэффективности (параграф 1.1). Кроме того, по данному вопросу выпущен ГОСТ 54430-2011 [14] «Оборудование металлообрабатывающее и деревообрабатывающее. Показатели энергоэффективности. Номенклатура. Методы определения и нормирования значений». В п. 5.1 которого говорится, что основной показатель энергоэффективности – есть удельный расход электроэнергии  $\mathcal{E}_y$ , т.е. отношение затрачиваемой оборудованием электроэнергии к объему продукции, произведенной за это же время при определенных условиях.

В данной диссертационной работе в качестве показателя оптимальной энергоэффективности принимается отношение затрачиваемой электроэнергии к объему срезанной стружки при оптимальной температуре в зоне резания [65].

Согласно параграфу 1.1 и [14], показателем энергоэффективности процесса резания является отношение количества энергии, расходуемого на единицу объема срезанной стружки за промежуток времени  $\tau_1$ :

$$K_{\mathcal{E}\Phi} = \frac{P_{рез} \cdot \tau_1}{V_{Стр} \cdot \tau_1}, \quad (5.3)$$

где  $K_{\mathcal{E}\Phi}$  – показатель энергоэффективности процесса резания;

$V_{Стр}$  – объем стружки, срезанной в единицу времени, определяется по выражению:

$$V_{Cmp} = s \cdot t \cdot v. \quad (5.4)$$

В этом случае уравнение (5.3) принимает вид:

$$K_{ЭФ} = \frac{P_{рез} \cdot \tau_1}{s \cdot t \cdot v \cdot \tau_1} = \frac{P_{рез}}{s \cdot t \cdot v}. \quad (5.5)$$

Температура резания  $\theta$  связана с мощностью, затрачиваемой на процесс резания  $P_{рез}$  уравнениями (2.26) и (2.11).

По имитационной модели процесса резания (рисунок 5.2), определен показатель энергоэффективности при различной скорости резания и соответствующей ей температуре в зоне резания  $K_{ЭФ}=f(v, \theta)$ . Результаты представлены на графике рисунка 5.15.

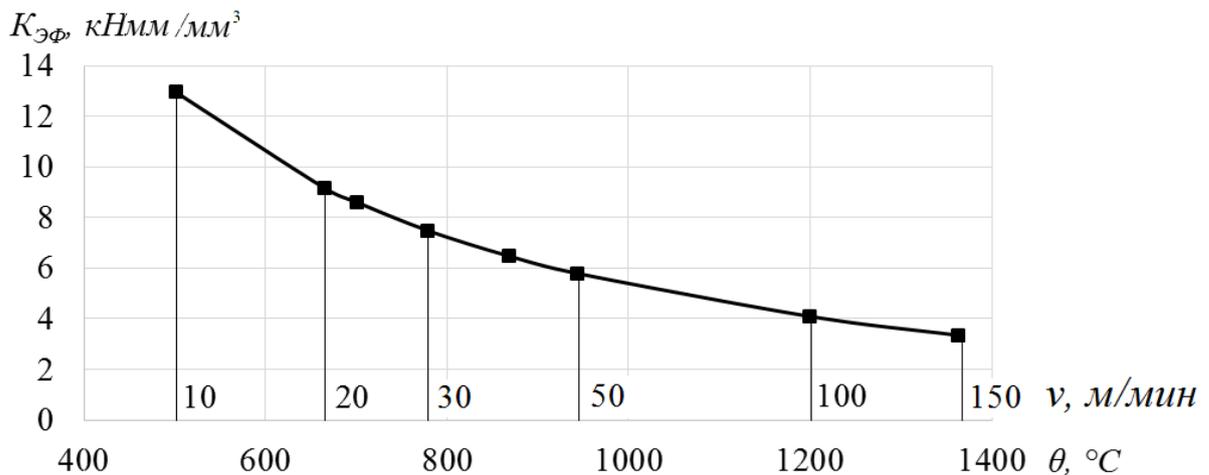


Рисунок 5.15 – Зависимость показателя энергоэффективности процесса лезвийной обработки от температуры в зоне резания

Оптимальная энергоэффективность процесса резания определяется для каждого режима резания. В частности, для стабилизации качества поверхностного слоя детали целесообразно обеспечить поддержание оптимальной температуры. В этом случае, показатель энергоэффективности составляет  $K_{ЭФ}=8,61 \text{ кН} \cdot \text{мм}/\text{мм}^3$ .

При температуре в зоне резания, ниже оптимальной энергоэффективность снижается, показатель энергоэффективности растет. При увеличении скорости

резания относительно оптимального значения, энергоэффективность повышается, показатель энергоэффективности снижается.

В случаях, когда требуется производить процесс резания при форсированных режимах, увеличивается скорость резания, растет температура в зоне резания и повышается энергоэффективность процесса резания.

## 5.2.2 Исследование характеристик системы «электропривод главного движения – станок»

Имитационная модель электропривода главного движения и станка разработана в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB на основе глав 3, 4, представлена на рисунке 5.16.

### 5.2.2.1 Исследование характеристик станка

Выходной координатой станка является скорость резания  $v$ . Величина скорости резания определяется выражением (3.9):

$$v = \omega_{III} \cdot R_3.$$

Угловая частота вращения шпинделя  $\omega_{III}$  определяется по выражению (5.6). Радиус резания  $R_3=50$ мм. Оптимальная скорость резания  $v_O=22,64$  м/мин.

$$\omega_{III} = \frac{v_O}{R_3} = \frac{(22,64 / 60) \text{ м / с}}{0,05 \text{ м}} = 7,55 \text{ с}^{-1}. \quad (5.6)$$

Передаточное отношение редуктора станка находится по выражению:

$$i = \frac{\omega_{\max \delta \varepsilon}}{\omega_{\max III}} = \frac{n_{\max \delta \varepsilon}}{n_{\max III}} = \frac{3000 \text{ мин}^{-1}}{2500 \text{ мин}^{-1}} = 1,2, \quad (5.7)$$

где  $\omega_{\max \delta \varepsilon}$  – максимальная угловая частота вращения вала двигателя привода главного движения станка;

$\omega_{\max III}$  – максимальная угловая частота вращения шпинделя станка;

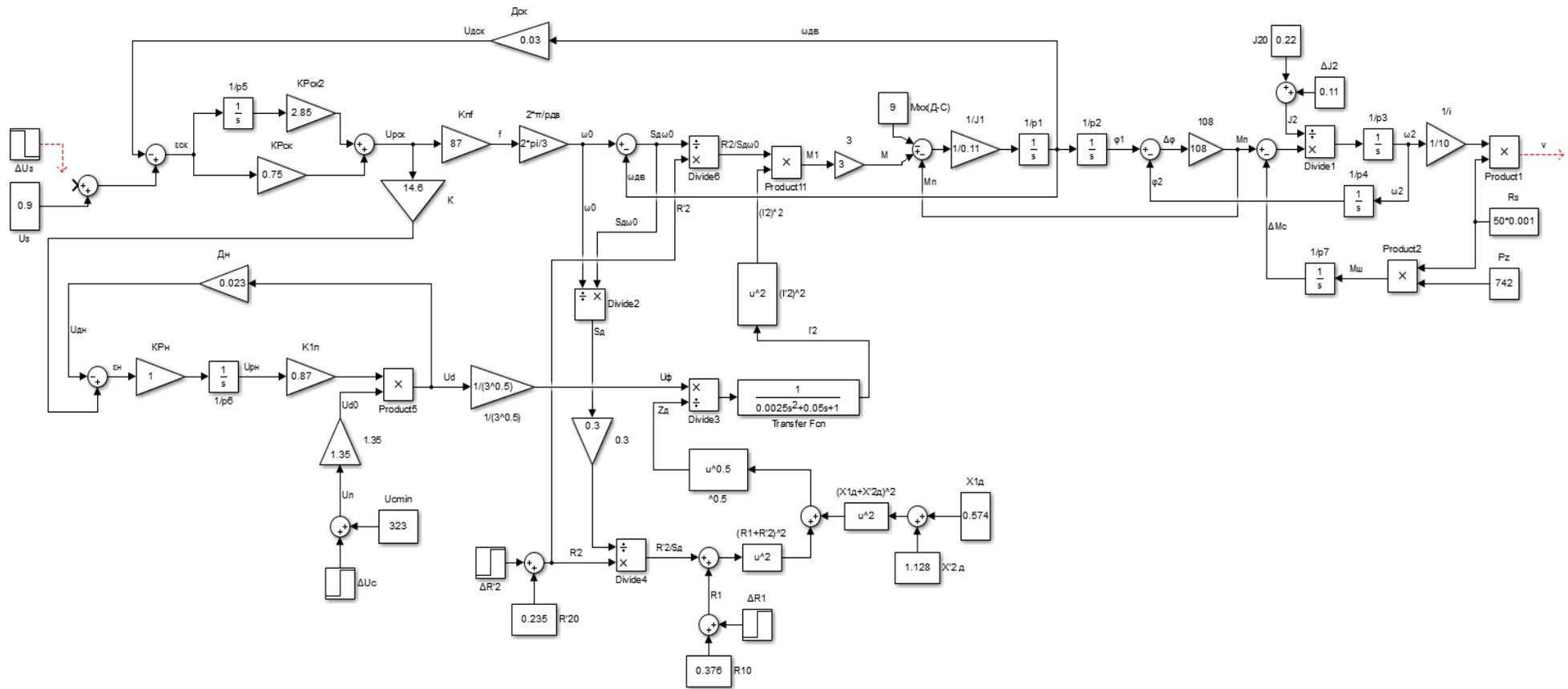


Рисунок 5.16 – Имитационная модель системы «электропривод главного движения – станок», разработанная в пакете SIMULINK MATLAB

$n_{maxдв}$  – максимальная скорость вращения вала двигателя привода главного движения станка, определяется из таблицы 5.2;

$n_{maxш}$  – максимальная скорость вращения шпинделя станка, определяется из таблицы 5.1.

Угловая частота на выходе упругого звена с учетом приведения к валу двигателя  $\omega_2$ , определяется по выражению:

$$\omega_2 = \omega_{ш} \cdot i = 7,55c^{-1} \cdot 1,2 = 9,056c^{-1}. \quad (5.8)$$

Момент шпинделя  $M_{ш}$  определяется по выражению (3.30):

$$M_{ш} = P_z \cdot R_3 = 1644H \cdot 0,05m = 82,2H \cdot m.$$

Изменение момента сопротивления, создаваемого процессом резания, приведенного к валу двигателя определяется по выражению (3.29):

$$\Delta M_{c2} = \frac{M_{ш}}{i} = \frac{82,8H \cdot m}{1,2} = 68,71H \cdot m.$$

Моменты инерции шкива ременной передачи, редуктора и шпинделя, приведенные к валу двигателя определяются по выражению:

$$J_{20} = 2 \cdot J_{дв} = 2 \cdot 0,11кг \cdot м^2 = 0,22кг \cdot м^2. \quad (5.9)$$

Момент инерции обрабатываемой детали, приведенный к валу двигателя определяется по выражению:

$$\Delta J_2 = J_{дв} = 0,11кг \cdot м^2. \quad (5.10)$$

Коэффициент упругости упругого звена определяется по выражению:

$$K_y = \frac{\Delta M_{п}}{\Delta \varphi} = \frac{108H \cdot м}{1^\circ}. \quad (5.11)$$

Момент инерции электродвигателя определяется по таблице 5.2:  
 $J_1 = 0,11 кг \cdot м^2.$

### 5.2.2.2 Исследование характеристик электропривода механизма главного движения станка

#### Момент холостого хода

Момент холостого хода конкретного станка определяется при включении станка без нагрузки. Учитывая, что расчет характеристик станка производится не для конкретного проекта, а скорее для методических целей, момент холостого хода можно принять, исходя из соображений, что КПД двигателя вместе с механизмом главного движения может колебаться в пределах 0,8-0,9, принимаем момент холостого хода системы «электропривод главного движения – станок», равным  $M_{ХХ(Д-С)} = 9 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Угловая частота вращения магнитного поля двигателя при частоте сети  $f=50\text{Гц}$  определяется по выражению [97]:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_{ДВ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Гц}}{3} = 109,6\text{с}^{-1}. \quad (5.12)$$

Коэффициент передачи преобразователя энергии по частоте определяется по выражению:

$$K_{Пф} = \frac{f_{\max}}{U_{Рск}} = \frac{400\text{Гц}}{10\text{В}} = 40 \frac{\text{Гц}}{\text{В}}, \quad (5.13)$$

где  $f_{\max}$  – максимальное значение выходной частоты преобразователя энергии,

$U_{Рск}$  – напряжение регулятора скорости,  $U_{Рск}=10\text{В}$ .

Напряжение датчика скорости  $U_{Дск}=10\text{В}$ .

Максимальная угловая частота вращения вала двигателя привода главного движения станка определяется по выражению:

$$\omega_{\max \text{дв}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\max \text{дв}}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314\text{с}^{-1}. \quad (5.14)$$

Коэффициент передачи датчика частоты вращения вала двигателя привода главного движения определяется по выражению:

$$K_{Дск} = \frac{U_{Дск}}{\omega_{ДВ}} = \frac{10B}{314c^{-1}} = 0,032B \cdot c. \quad (5.15)$$

Как было рассчитано в параграфе 3.4,  $U_{Cmin} = 323 \text{ В}$ ,  $U_{Cmax} = 418 \text{ В}$ ,  $\Delta U_C = 95 \text{ В}$ .

Напряжение выпрямителя, соответствующее минимальному напряжению сети определяется по выражению:

$$U_{d0} = U_{cmin} \cdot 1,35 = 323B \cdot 1,35 = 436,5B \quad (5.16)$$

Коэффициент передачи датчика напряжения преобразователя энергии определяется по выражению:

$$K_{ДН} = \frac{U_{Дн}}{U_{d0}} = \frac{10B}{436,5B} = 0,023 \frac{B}{B}, \quad (5.17)$$

где  $U_{Дн}$  – напряжение датчика напряжения преобразователя энергии.

Коэффициент передачи преобразователя энергии по напряжению определяется по уравнению:

$$K_{1П} = \frac{U_d}{U_{Pн} \cdot U_{d0}} = \frac{380B}{1 \cdot 436,5B} = 0,87 \frac{B}{B}, \quad (5.18)$$

где  $U_{Pн}$  – напряжение регулятора напряжения преобразователя энергии.

### 5.2.2.3 Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

Схема замещения асинхронного двигателя представлена на рисунке 5.17.

Для определения параметров схемы замещения воспользуемся литературой [34].

Реактивное сопротивление обмотки статора  $X_{1Д}$  определяется по выражению:

$$X_{1Д} = \frac{X'_{1Д} \cdot U_{\Phiном}}{I_{НОМ}} = \frac{0,061 \cdot 220B}{23,4A} = 0,574 \text{ Ом}, \quad (5.19)$$

где  $X'_{1Д}$  – реактивное сопротивление обмотки статора, принимается из таблицы [34];

$I_{НОМ}$  – номинальное значение тока двигателя привода главного движения, определяется из таблицы 5.2.

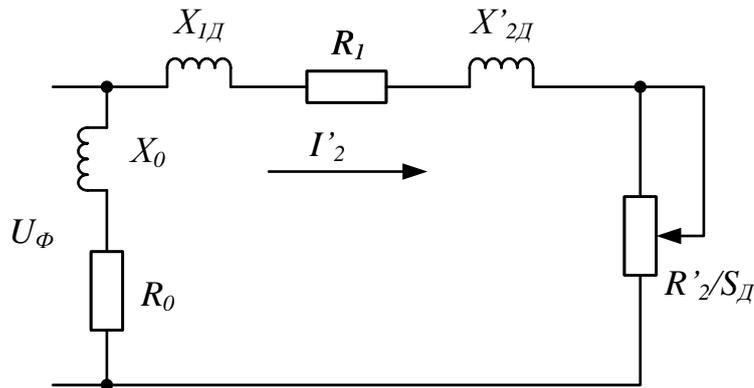


Рисунок 5.17 – Схема замещения асинхронного двигателя

Реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное в цепь статора  $X'_2$  определяется по выражению:

$$X'_{2Д} = \frac{X''_{2Д} \cdot U_{\PhiНОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{0,12 \cdot 220В}{23,4} = 1,128 Ом, \quad (5.20)$$

где  $X''_{2Д}$  – реактивное сопротивление обмотки ротора, приведенное в цепь статора, принимается из таблицы [34].

Сопротивление обмотки статора при 20°C определяется по выражению:

$$R_{10} = \frac{R'_1 \cdot U_{\PhiНОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{0,04 \cdot 220В}{23,4А} = 0,376 Ом, \quad (5.21)$$

где  $R'_1$  – сопротивление обмотки статора, принимается из таблицы [34].

Сопротивление обмотки ротора, приведённое к цепи статора при 20°C определяется по выражению:

$$R'_{20} = \frac{R''_2 \cdot U_{\PhiНОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{0,025 \cdot 220В}{23,4А} = 0,235 Ом, \quad (5.22)$$

где  $R'_{2}$  – сопротивление обмотки ротора, приведенное в цепь статора, принимается из таблицы [34].

Приращение сопротивления обмотки ротора, приведённое к цепи статора при номинальной температуре определяется по выражению:

$$\Delta R'_2 = 0,25 \cdot R'_{20} = 0,25 \cdot 0,235 = 0,059 \text{ Ом} . \quad (5.23)$$

Приращение сопротивления обмотки статора при нагреве до номинальной температуры определяется по выражению:

$$\Delta R_1 = 0,25 \cdot R_{10} = 0,25 \cdot 0,376 = 0,094 \text{ Ом} . \quad (5.24)$$

Ток электродвигателя на модели определяется согласно схеме замещения (рисунок 5.17) по выражению:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{z_D} , \quad (5.25)$$

где  $z_D$  – полное сопротивление цепи ротора и статора определяется по выражению:

$$z_D = \sqrt{(X_{1D} + X'_{2D}) + \left( R_1 + \frac{R'_2}{S_D} \right)^2} . \quad (5.26)$$

Сопротивления  $R_1$  и  $R'_2$  определяются по выражениям (3.12) и (3.13) соответственно.

Момент двигателя определяется по выражению (4.1).

Коэффициент передачи двигателя по моменту с учетом уравнения (4.1) определяется по выражению (4.2):

$$K_{ДВ} = \frac{M_{НОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{108 \text{ Н} \cdot \text{м}}{23,4 \text{ А}} = 4,62 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} .$$

Угловая частота вращения вала двигателя привода главного движения может быть определена с учетом выражения (3.43) по уравнению:

$$\omega_{ДВ}(p) = \frac{M(p) - M_{ХХ} - M_{П}(p)}{J_1 \cdot p} . \quad (5.27)$$

Переходная функция угловой частоты вращения по управляющему воздействию  $\Delta U_3=0,6\text{В}$  имеет вид (рисунок 5.18).

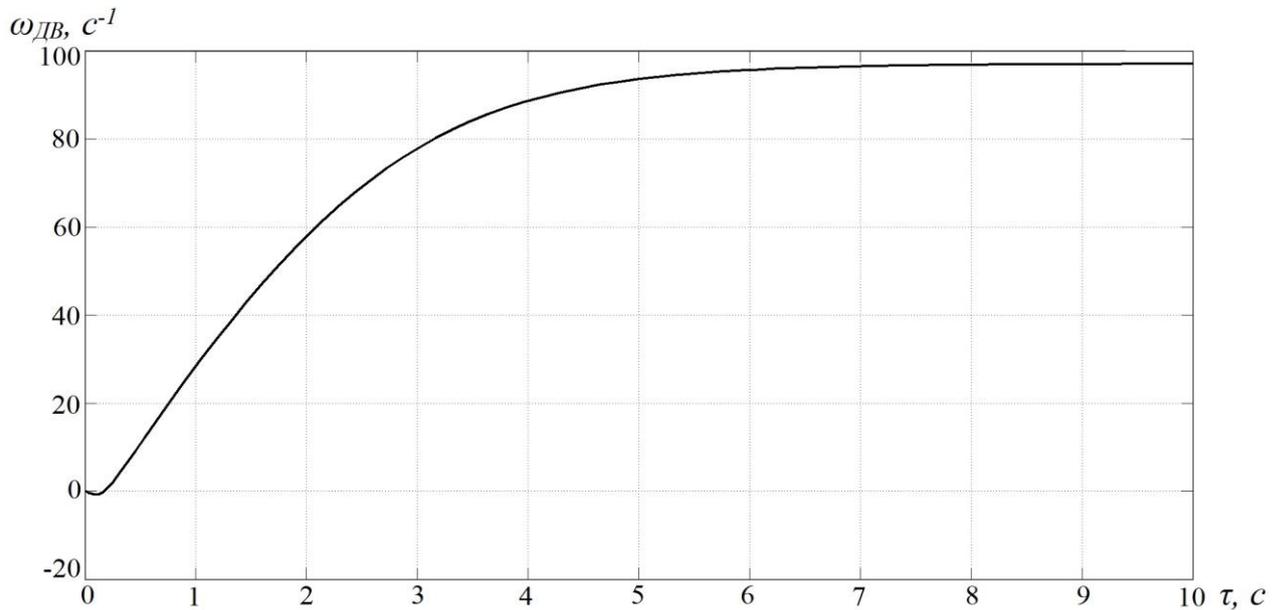


Рисунок 5.18 – Переходная функция угловой частоты вращения главного привода по управляющему воздействию  $\Delta U_3=0,6\text{В}$

#### 5.2.2.4 Исследование характеристик электропривода главного движения станка при действии возмущений

##### 1. Механические характеристики

Электропривод включает в себя преобразователь энергии, двигатель и обратную связь по угловой частоте вала двигателя.

В качестве возмущающих воздействий приняты изменения сопротивлений обмоток статора и ротора, колебание сетевого напряжения, изменение момента сопротивления двигателя, изменение момента инерции.

Построены механические характеристики электропривода разомкнутой и замкнутой систем электропривода.

Исходные данные для построения характеристик приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Исследование механических характеристик электропривода

M, Нм	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	105
ωдв, f=50Гц, ΔR≠0	108,9	107,9	106,8	105,8	104,7	103,5	102,4	101,2	100,1	98,9	97,0
ωдв, f=50Гц, ΔR=0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	101,1	99,7
ωдв, f=40Гц, ΔR≠0	83,5	82,4	81,3	80,2	79,1	78,0	76,8	75,6	74,4	73,1	71,1
ωдв, f=15Гц, ΔR=0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,7	15,6
ωдв, f=15Гц, ΔR≠0	30,7	29,6	28,4	27,2	25,9	24,5	22,8	21,0	18,7	16,0	10,4
ωдв, f=10Гц, ΔR≠0	19,7	18,6	17,4	16,0	14,3	12,2	9,3	5,3	-0,0	-6,5	-17,8
ωдв, f=20,5Гц, ΔR=0	33,2	33,1	32,9	32,8	32,6	32,4	32,2	32,0	31,8	31,6	31,3
ωдв, f=20,5Гц, ΔR≠0	—	—	—	—	—	32,2	32,0	31,7	31,5	31,2	30,8
ωдв, f=5,41Гц, ΔR≠0	11,0	10,8	10,6	10,4	10,1	9,7	9,4	9,0	8,6	8,2	7,5
ωдв, f=5,41Гц, ΔR=0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,6	8,0

Графики механических характеристик разомкнутой и замкнутой систем электропривода представлены на рисунке 5.19.

### **Анализ механических характеристик**

#### **Для разомкнутой системы электропривода**

При уменьшении частоты вращения магнитного поля относительно номинального значения, равного  $\omega_0=109,6\text{с}^{-1}$ , механическая характеристика опускается параллельно самой себе.

При диапазоне регулирования 3,3 ошибка угловой частоты вращения, возникающая от действия возмущений, составляет 66%.

Следовательно для увеличения диапазона регулирования и уменьшения ошибки регулирования необходимо применить САР угловой частоты вращения вала двигателя главного привода. Для этого необходимо организовать обратную связь по угловой частоте вращения вала двигателя. Обратная связь по угловой частоте вращения вала двигателя реализуется при помощи датчика обратной связи.

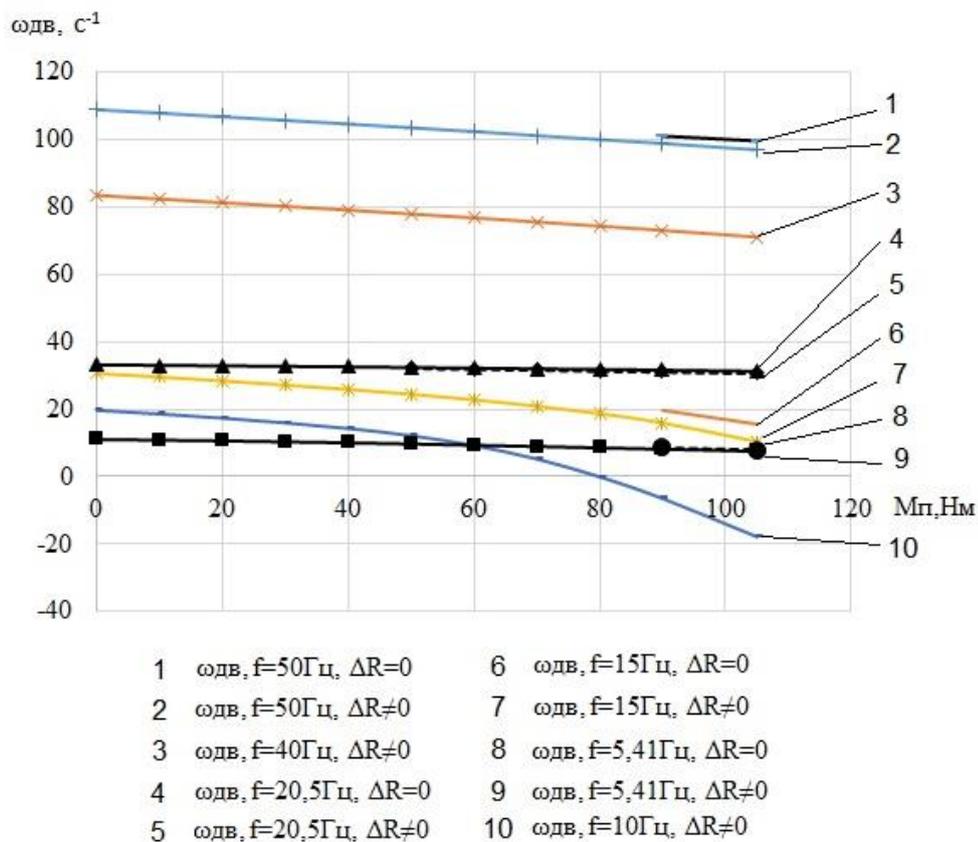


Рисунок 5.19 – Механические характеристики двигателя для разомкнутой (1, 2, 3, 6, 7, 10 характеристики) и для замкнутой (4, 5, 8, 9 характеристики) САР угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения

### Для замкнутой системы электропривода

В результате применения САР угловой частоты вращения вала двигателя главного привода, в диапазоне 3,3 точность регулирования составляет 6%.

На рисунке 5.19 кривые 4, 5, 8, 9 получены при замкнутой САР угловой частоты вращения вала двигателя. При действии возмущений, механические характеристики двигателя практически совпадают (4 с 5, 8 с 9), ошибка составляет 1,6%, что соизмеримо с толщиной линии на рисунке 5.19.

### 2. Регулировочная характеристика САР угловой частоты вращения вала (САР скорости) двигателя привода главного движения

Регулировочная характеристика САР скорости двигателя привода главного движения представлена на рисунке 5.20.

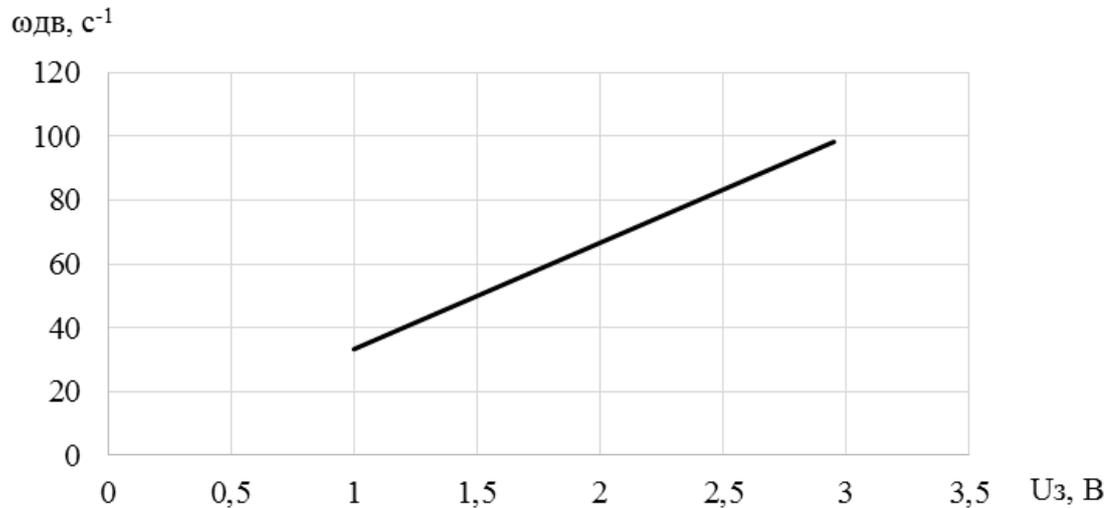


Рисунок 5.20 – Регулировочная характеристика САР скорости двигателя привода главного движения станка

Регулировочная характеристика является линейной и не имеет зоны дрейфа.

### 3. Динамические характеристики САР скорости двигателя привода главного движения

Динамические характеристики САР скорости двигателя привода главного движения представлены в виде переходных функций при изменении управляющего воздействия и действии возмущений при  $U_3=2,95В$  на рисунке 5.21, при  $U_3=0,9В$  на рисунке 5.22.

По динамическим характеристикам можно судить, что САР угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения является устойчивой. Благодаря наличию астатической САР угловой частоты статическая ошибка полностью компенсируется.

Максимальное отклонение выходной координаты возникает от изменения момента сопротивления. При изменении момента сопротивления от 0 до  $50Н·м$  отклонение угловой частоты составляет  $2,1c^{-1}$  относительно  $30c^{-1}$ . После скачка угловая частота восстанавливается через  $0,8с$ .

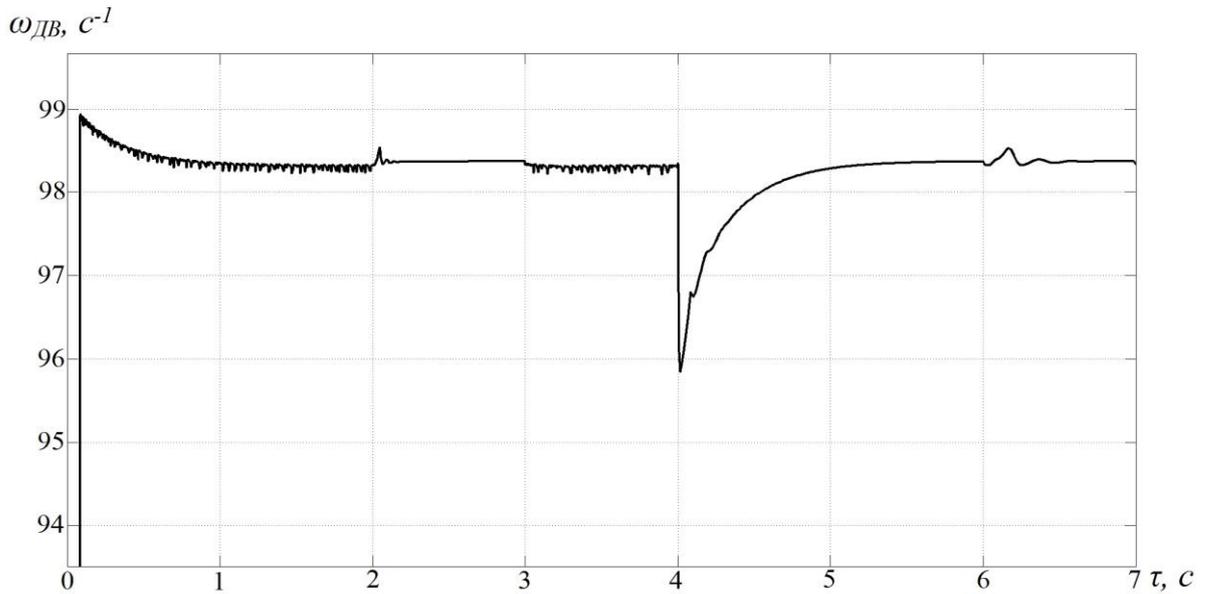


Рисунок 5.21 – Переходные функции САР скорости привода главного движения при изменении управляющего воздействия  $\Delta U_3=2,95\text{В}$  на 0с, при увеличении сопротивления  $\Delta R'_2+\Delta R_I=0,25\cdot(R'_{20}+R_{I0})\text{Ом}$  на 2с, при увеличении напряжения сети  $\Delta U_C=95\text{В}$  на 3с, при увеличении момента сопротивления нагрузки  $M_{II}=105\text{Н}\cdot\text{м}$  на 4с, при увеличении момента инерции, приведенного к валу ротора двигателя  $\Delta J=0,11\text{кг}\cdot\text{м}^2$  на 6с

### 5.2.3 Исследование характеристик электропривода механизма подачи

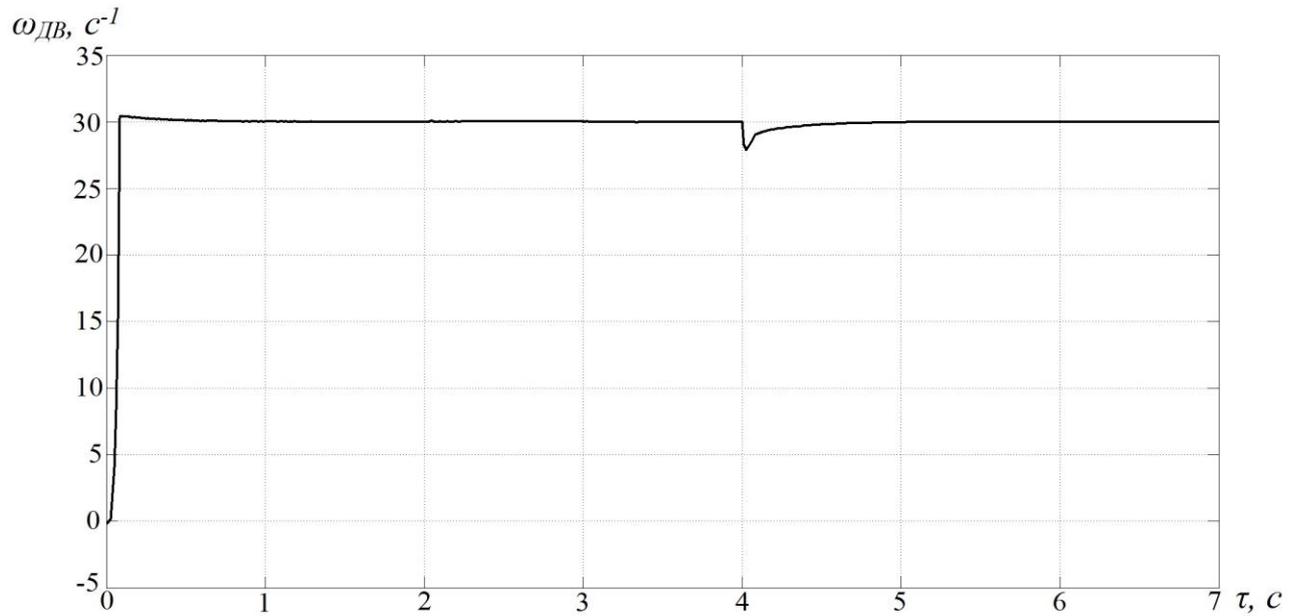
Модель электропривода механизма подачи разработана в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB на основе глав 3, 4.

Согласно паспортным данным станка (таблица 5.1) максимальная рекомендуемая рабочая скорость продольной подачи  $v_n=2000\text{мм/мин}$ .

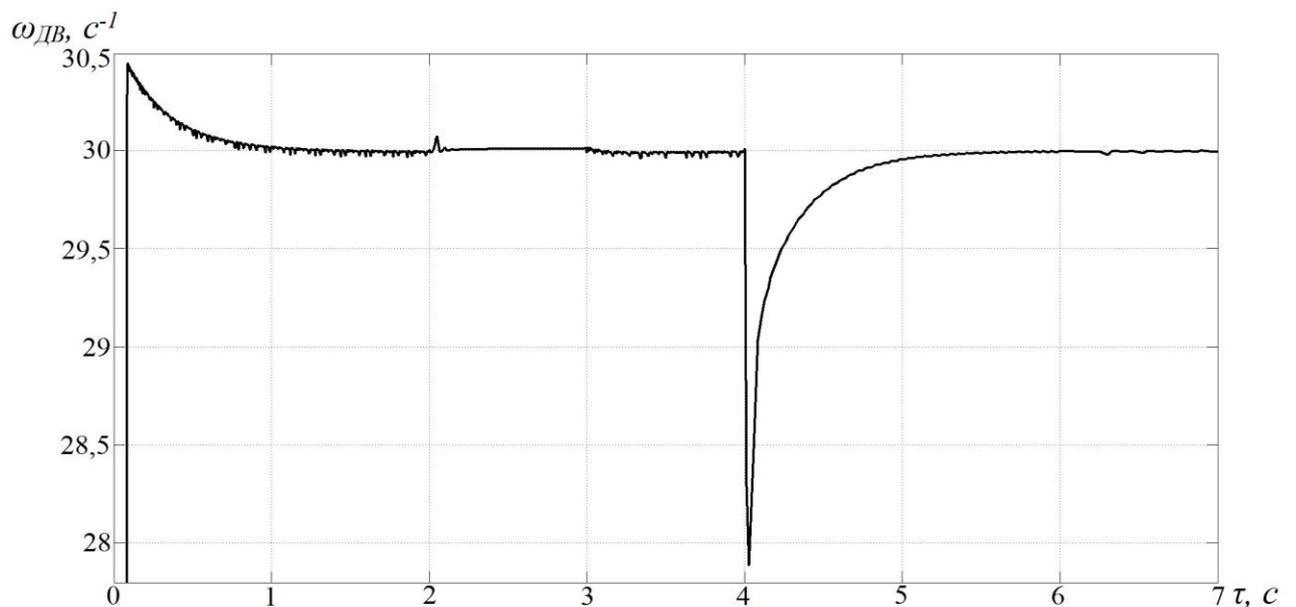
Скорость вращения вала двигателя подачи по паспортным данным станка (таблица 5.1)  $n_{ДП} = 1060\text{ об/мин}$ .

Угловая частота вращения вала двигателя подачи определяется по выражению:

$$\omega_{ДП} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{ДП}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1060 \text{ об / мин}}{60} = 111 \text{ c}^{-1}. \quad (5.28)$$



а) абсолютный масштаб



б) увеличенный масштаб

Рисунок 5.22 – Переходные функции САР скорости главного привода при изменении управляющего воздействия  $\Delta U_3=0,9\text{В}$  на 0с, при увеличении сопротивления  $\Delta R'_2+\Delta R_l=0,25\cdot(R'_{20}+R_{l0})\text{Ом}$  на 2с, при увеличении напряжения сети  $\Delta U_C=95\text{В}$  на 3с, при увеличении момента сопротивления нагрузки  $M_{П}=50\text{Н}\cdot\text{м}$  на 4с, при увеличении момента инерции, приведенного к валу ротора двигателя  $\Delta J=0,11\text{кг}\cdot\text{м}^2$  на 6с

Коэффициент передачи механизма преобразования угловой частоты вращения вала двигателя подачи в скорость подачи определяется по выражению:

$$K_{МП} = \frac{v_{П}}{\omega_{ДП}} = \frac{2000 \text{ мм/мин}}{111 \text{ с}^{-1}} = 18 \frac{\text{мм/мин}}{\text{с}^{-1}}. \quad (5.29)$$

Номинальный момент двигателя привода подачи определяется по выражению:

$$M_{ДПном} = \frac{P_{Пном}}{\omega_{ДП}} = \frac{1600 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}}{111 \text{ с}^{-1}} = 14,4 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.30)$$

Момент холостого хода двигателя привода подачи определяется по выражению:

$$M_{ХХП} = 0,1 \cdot M_{ДПном} = 0,1 \cdot 14,4 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1,44 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.31)$$

Конструктивные параметры связи момента и тока двигателя привода подачи определяются по выражению:

$$C_M \cdot \Phi = \frac{M_{ДПном}}{I_{Яном}} = \frac{14,4 \text{ Н} \cdot \text{м}}{3,63 \text{ А}} = 3,97 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (5.32)$$

Сопротивление якорной цепи при номинальной нагрузке, то есть при номинальной температуре равной 80°C определяется по выражению:

$$R_{ЯЦ} = (R_{Я} + R_{Доп}) \cdot 1,25 = (1,88 \text{ Ом} + 1,39 \text{ Ом}) \cdot 1,25 = 4,09 \text{ Ом}, \quad (5.33)$$

где  $R_{Доп}$  – сопротивление дополнительных полюсов двигателя.

Конструктивные параметры связи угловой частоты вращения и ЭДС двигателя постоянного тока привода механизма подачи определяются по выражению:

$$C_e \cdot \Phi = \frac{U_{Яном} - I_{Яном} \cdot R_{ЯЦ}}{\omega_{ДП}} = \frac{440 \text{ В} - 3,63 \text{ А} \cdot 4,09 \text{ Ом}}{111 \text{ с}^{-1}} = 3,83 \text{ В} \cdot \text{с}. \quad (5.34)$$

Произведено моделирование механизма подачи. По модели исследованы статические и динамические характеристики электропривода подачи.

Электропривод подачи представляет собой многоконтурную САР.

Частотные характеристики контура тока привода подачи представлены на рисунке 5.23.

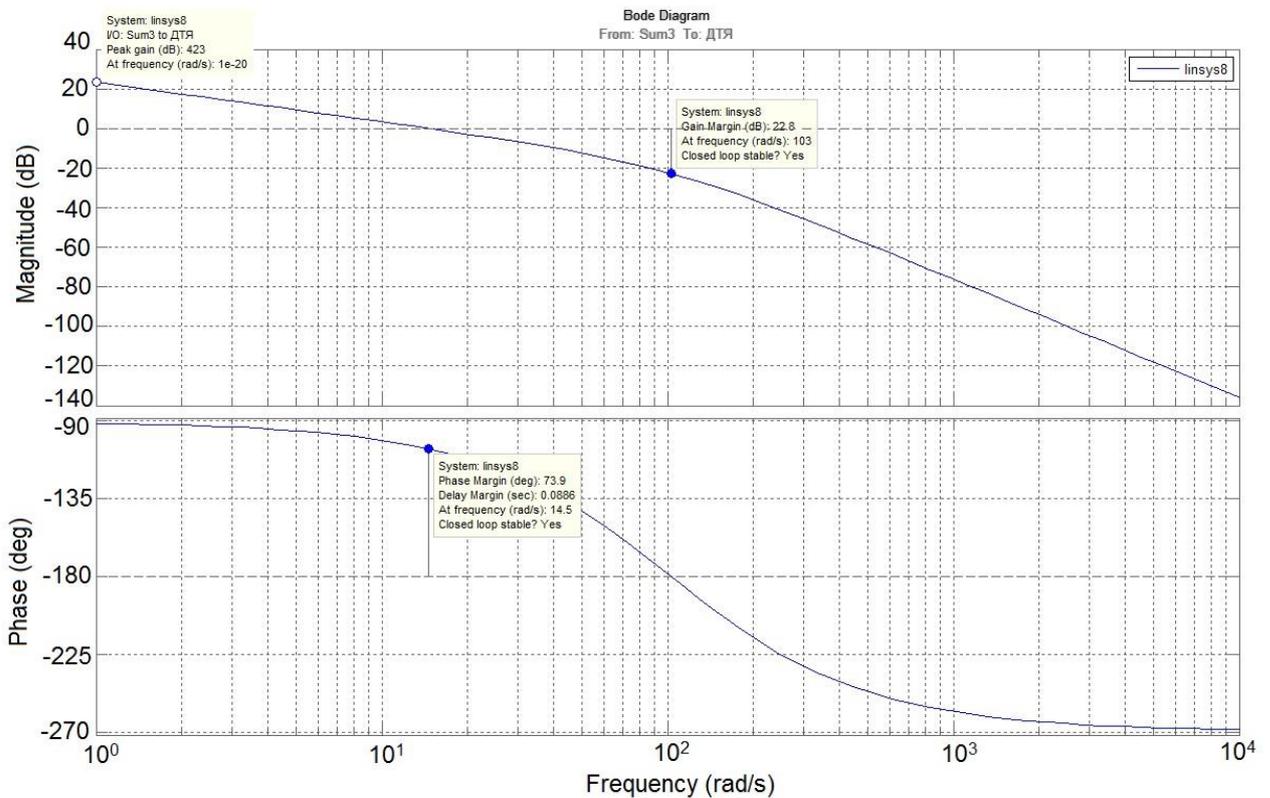


Рисунок 5.23 – Логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) контура тока привода подачи

Переходные функции САР тока якоря привода подачи при изменении управляющего воздействия и при действии возмущений представлены на рисунке 5.24.

Переходные функции САР угловой частоты вращения вала двигателя привода подачи при изменении управляющего воздействия и при действии возмущений представлены на рисунке 5.25.

Регулировочная характеристика привода подачи  $\omega_{ДПТ}=f(U_{Ppз})$  представлена на рисунке 5.26.

Диапазон регулирования составляет  $111\text{с}^{-1}/1\text{с}^{-1}=111$ .

Электропривод механизма подачи устойчив, компенсирует действие возмущений, имеет нулевую статическую ошибку.

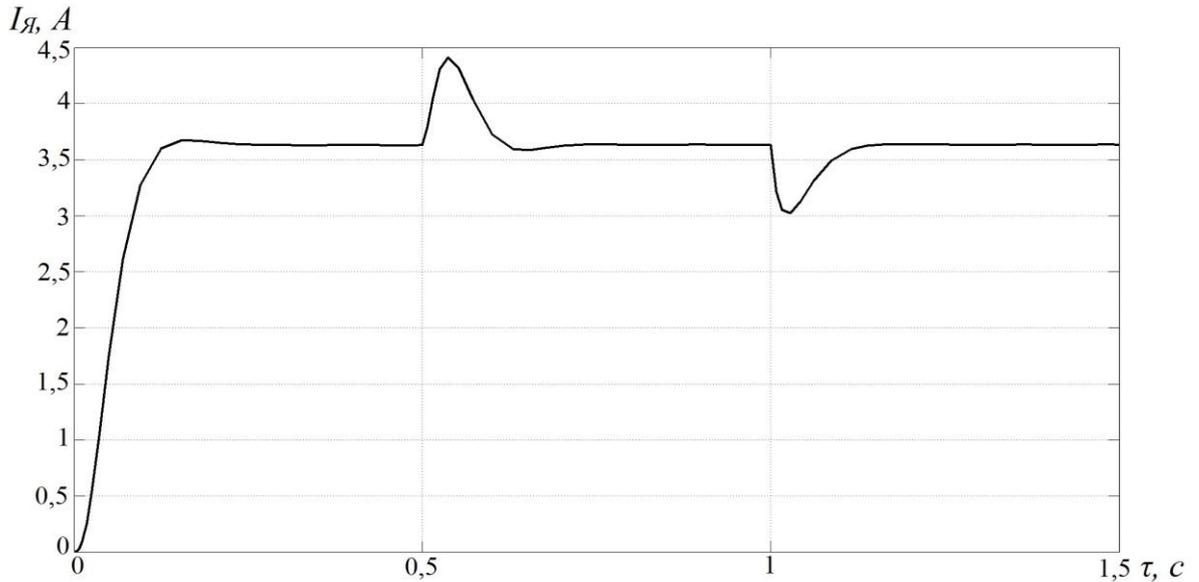


Рисунок 5.24 – Переходные функции САР тока якоря привода подачи при изменении управляющего воздействия  $\Delta U_{ppz}=1\text{В}$ , при увеличении напряжения сети  $\Delta U_C=95\text{В}$  на 0,5 секунде, при увеличении сопротивления цепи якоря  $\Delta R_{яц}=0,25 \cdot R_{яц0}$  Ом на 1 секунде

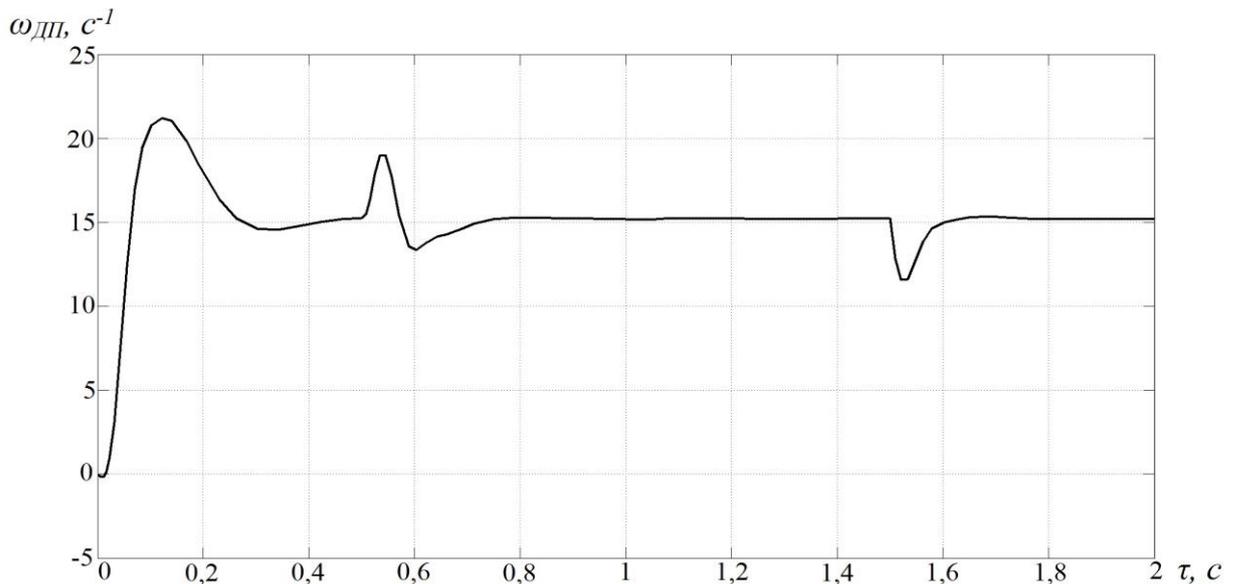


Рисунок 5.25 – Переходные функции САР угловой частоты вращения вала двигателя привода подачи при изменении управляющего воздействия  $\Delta U_{ppz}=1,52\text{В}$ , при увеличении напряжения сети  $\Delta U_C=95\text{В}$  на 0,5с, при увеличении сопротивления цепи якоря  $\Delta R_{яц}=0,25 \cdot R_{яц0}$  Ом на 1с, при увеличении момента сопротивления нагрузки  $M_{py}=12,96\text{Н}\cdot\text{м}$  на 1,5с

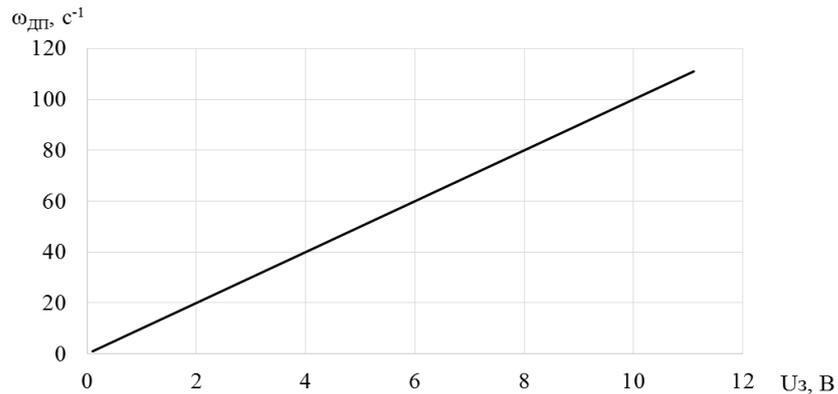


Рисунок 5.26 – Регулировочная характеристика привода подачи  $\omega_{дп}=f(U_{Ppz})$

#### 5.2.4 Исследование взаимодействия процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок»

Модель взаимодействия процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок» разработана в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB на основе глав 3, 4.

Исследована регулировочная характеристика модели системы «электропривод – станок»  $v=f(U_3)$ . График регулировочной характеристики представлен на рисунке 5.27. Регулировочная характеристика представляет собой линейную зависимость.

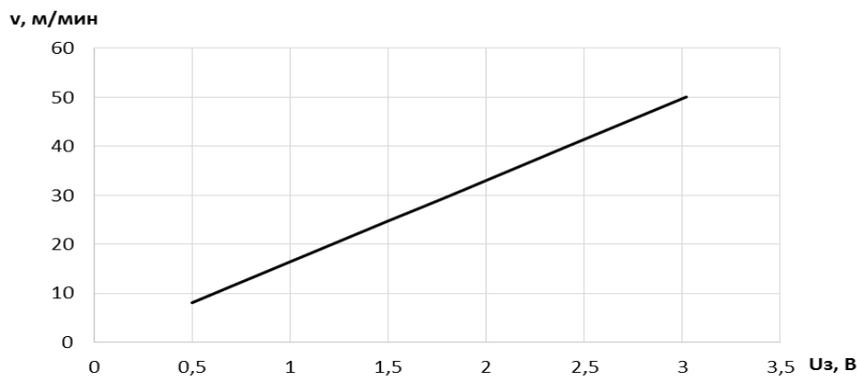


Рисунок 5.27 – Регулировочная характеристика системы «электропривод главного движения – станок»

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. Графики регулировочных характеристик  $\theta=f(U_3)$  представлены на рисунках 5.28-5.31.

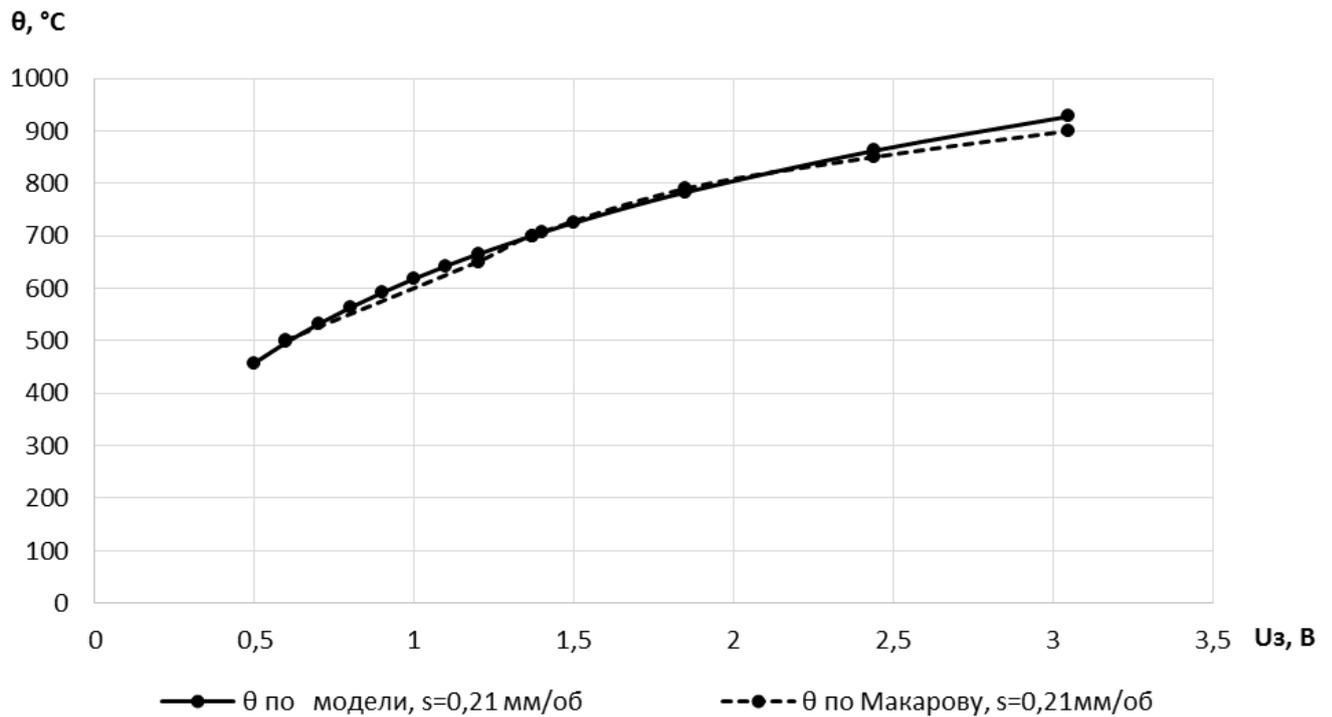


Рисунок 5.28 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(U_3)$  при  $s=0,21$  мм/об

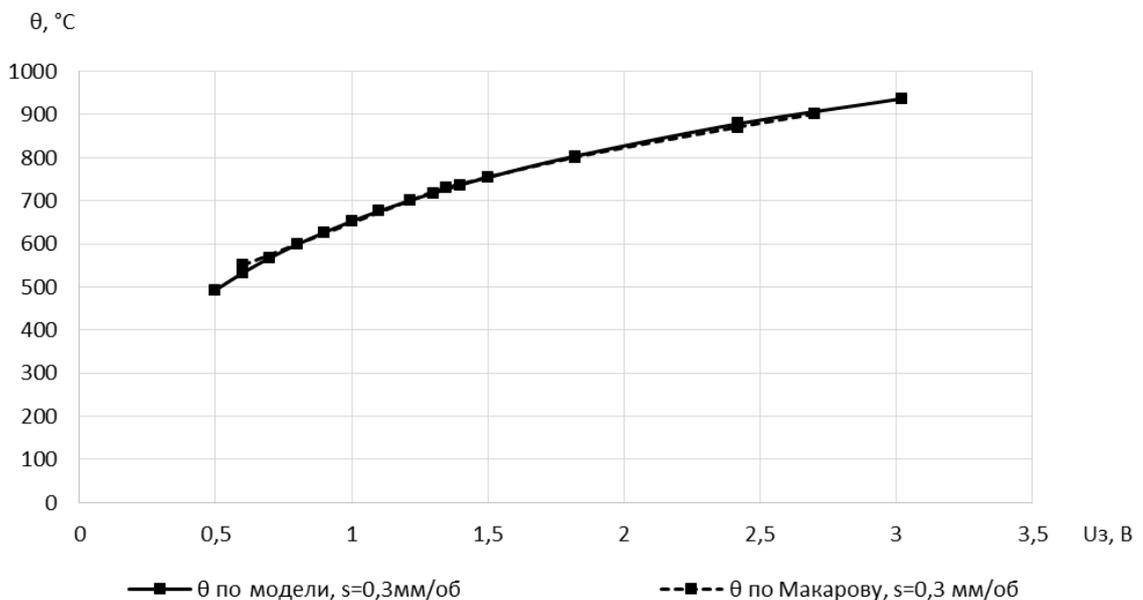


Рисунок 5.29 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(U_3)$  при  $s=0,3$  мм/об

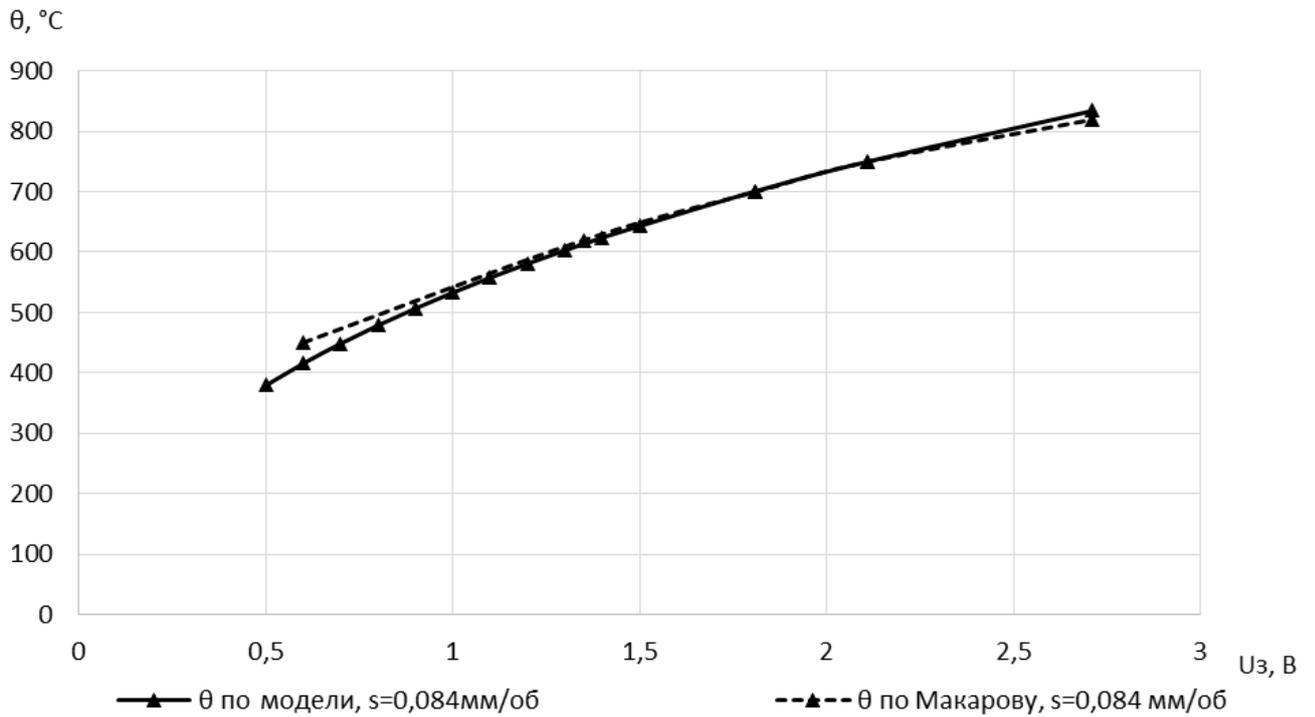


Рисунок 5.30 – Регулировочные характеристики  $\theta=f(U_3)$  при  $s=0,084$  мм/об

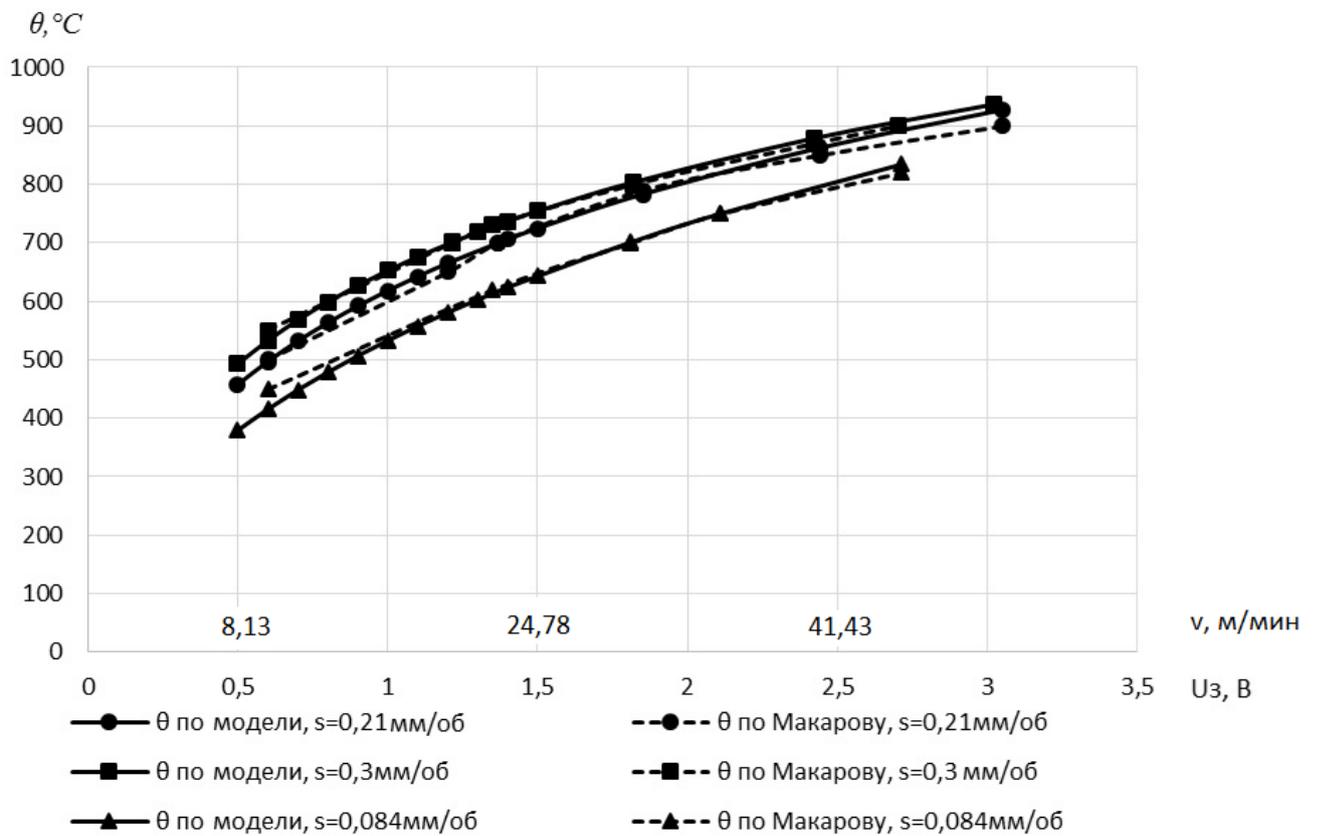


Рисунок 5.31 – Совмещенные графики регулировочных характеристик  $\theta=f(U_3, \nu)$  при различных значениях подач

Для проверки модели зависимости изменения температуры в зоне резания  $\theta$  от напряжения задания  $U_3$ , подаваемого на вход электропривода главного движения, произведено сопоставление с зависимостью изменения температуры от скорости резания, полученной на натурной установке [42]. Соответствие скорости резания напряжению задания установлено по регулировочной характеристике, представленной на рисунке 5.27.

Таким образом, в параграфе 5.2.4 произведено исследование взаимодействия процесса резания и системы «электропривод главного движения – станок».

На основании полученных графиков регулировочных характеристик (рисунки 5.28-5.31) можно сделать вывод о взаимосвязи характеристик электропривода главного движения станка с процессом резания. При изменении задания электропривода температура в зоне резания изменяется. Графики изменения температуры при различных значениях подачи, полученные на модели и на реальной установке, имеют высокую сходимость. То есть, можно считать, что законы изменения температуры при различных значениях подачи, полученные в результате моделирования, соответствуют законам, полученным при натуральных исследованиях [42].

Изменение подачи производит смещение регулировочной характеристики, отклоняя значение выходной координаты – температуры в зоне резания. Это представлено на совмещенном графике регулировочных характеристик при различных значениях подач (рисунок 5.31). То есть при одном и том же значении управляющей координаты при различных значениях подач могут быть различные значения выходной координаты  $\theta$ . Следовательно, изменение подачи в ходе процесса резания можно считать возмущающим воздействием для температуры в зоне резания металла.

### 5.3 Исследование характеристик модели измерителя температуры в зоне резания

Имитационная модель измерителя температуры в зоне резания построена на основании параграфа 4.8, разработана в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB представлена на рисунке 5.32.

Модель измерителя температуры в зоне резания идентична модели процесса резания. Статические и динамические характеристики модели измерителя температуры идентичны характеристикам модели процесса резания, представлены в параграфе 5.2.

### 5.4 Исследование статических и динамических характеристик системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла

Функциональная схема САРТ представлена на рисунке 4.1, структурная схема САРТ приведена в приложении А.

Элементы САРТ – преобразователи энергии привода главного движения и привода подачи, двигатели привода главного движения и привода подачи – подвержены возмущениям, действия которых компенсированы за счет применения локальных контуров автоматического регулирования.

Однако некомпенсированная часть – возмущения механизма подачи и главного привода – могут вызывать отклонение  $\Delta s$ . Кроме того, может отклоняться величина  $\Delta t$ . Поэтому требуется применение обратной связи непосредственно по температуре в зоне резания.

Работоспособность САРТ исследуется на имитационной модели, разработанной в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB.

САРТ исследуется на действие возмущений от  $\Delta R'_2$ ,  $\Delta R_1$ ,  $\Delta U_C$ ,  $\Delta J_2$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta t$ , а также на изменение управляющего воздействия  $\Delta U_3$  (рисунок 5.33).

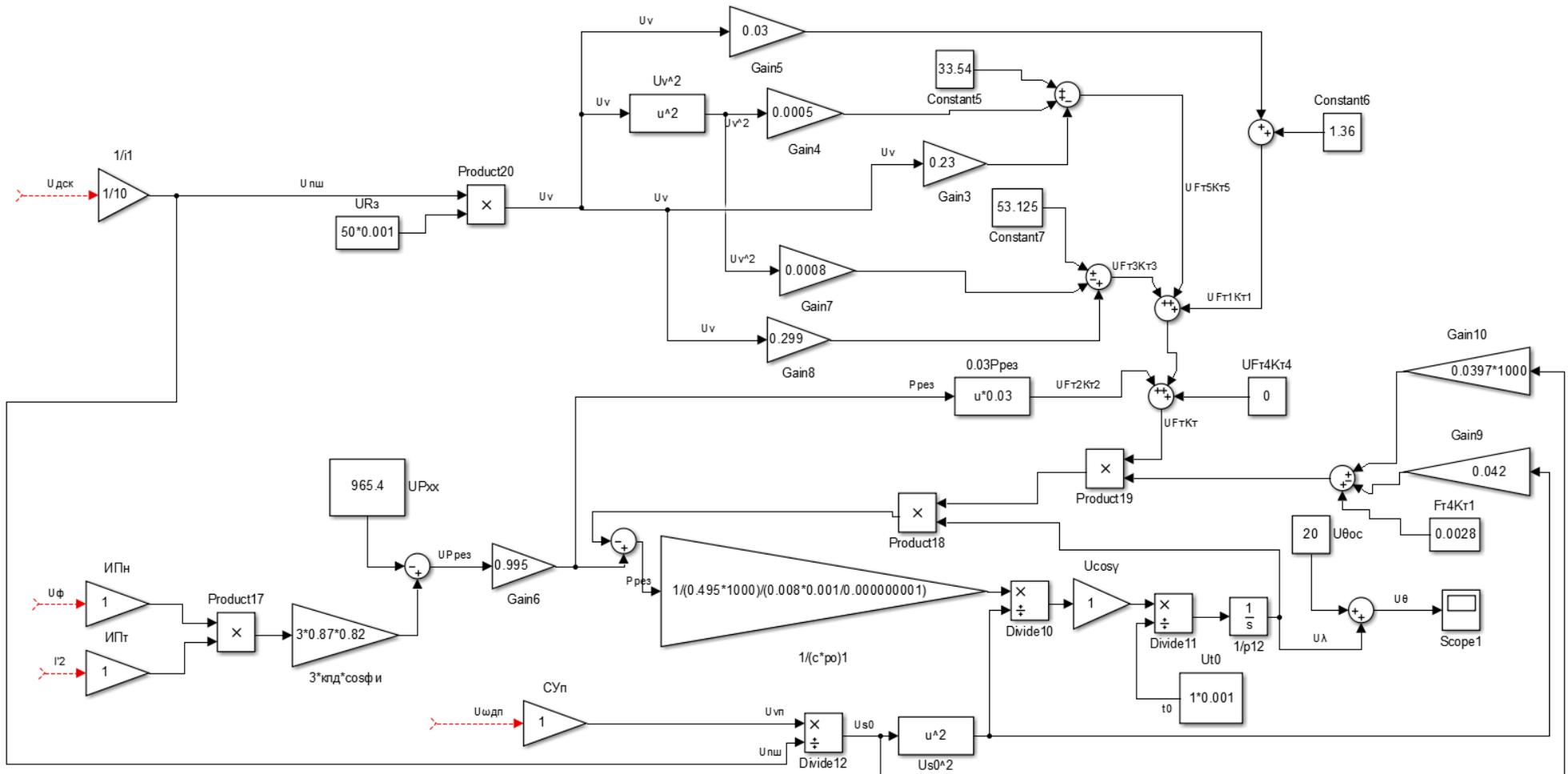
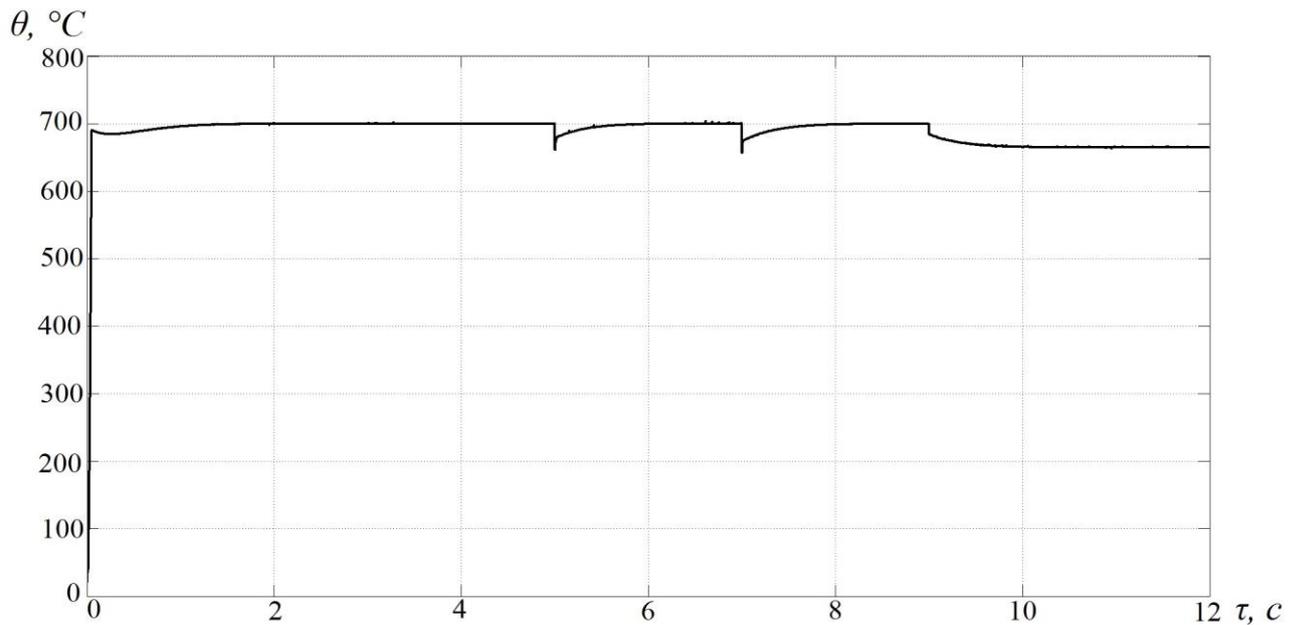
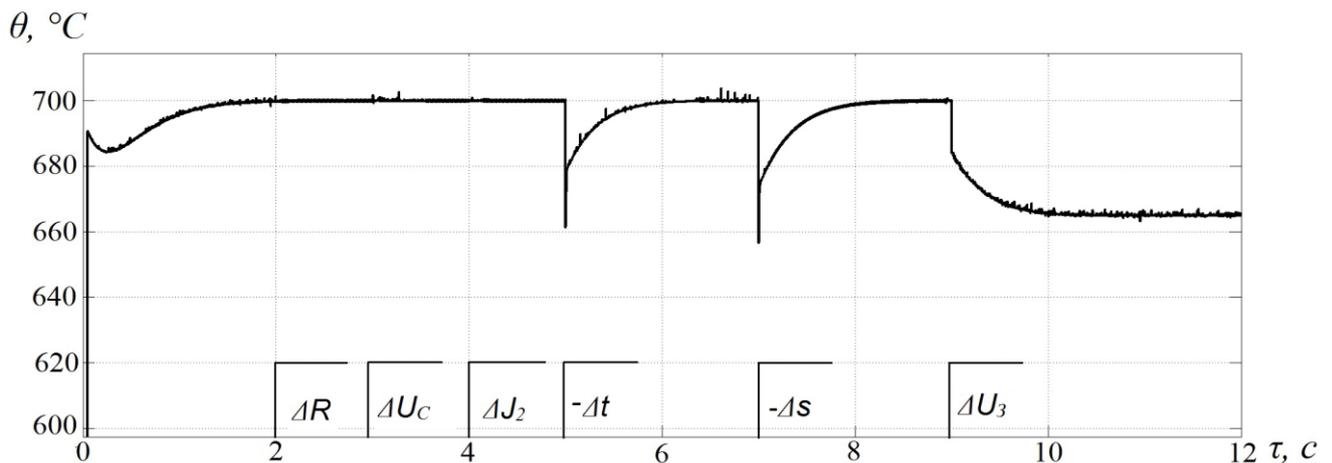


Рисунок 5.32 – Имитационная модель измерителя температуры в зоне резания, реализованная в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB



а) абсолютный масштаб



б) увеличенный масштаб

Рисунок 5.33 – Динамика изменения температуры в зоне резания при действии возмущений и изменении управляющего воздействия: при увеличении сопротивления обмоток ротора и статора двигателя привода главного движения на  $\Delta R'_2 + \Delta R_{I1} = 0,25 \cdot (R'_{20} + R_{I0})$  Ом на 2с, при увеличении напряжения сети на  $\Delta U_C = 0,3 \cdot U_{Cmin}$  В на 3с, при увеличении момента инерции обрабатываемой детали на  $\Delta J_2 = 0,5 \cdot J_{20}$  кг·м<sup>2</sup> на 4с, при уменьшении глубины резания на  $\Delta t = 0,1 \cdot t_0$  мм на 5с, при уменьшении подачи на  $\Delta s = 0,15 \cdot s_0$  мм/об на 7с, при уменьшении управляющего воздействия на  $\Delta U_3 = 0,05 \cdot U_3$  В на 9с

Для ликвидации статической ошибки в САРТ применен ПИ-регулятор.

На основе графиков рисунка 5.33 можно сделать вывод, что САРТ полностью компенсирует действие возмущений в статических режимах от  $\Delta R'_2$ ,  $\Delta R_l$ ,  $\Delta U_C$ ,  $\Delta J_2$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta t$ . При действии возмущений  $\Delta s$ ,  $\Delta t$  возникает динамическая ошибка, которая обусловлена тем, что используется интегральный регулятор, а возмущающие воздействия поступают в виде единичного скачка. В процессе резания поступление возмущений  $\Delta s$ ,  $\Delta t$  в виде единичного скачка, как правило, не возникает. Поэтому предполагается, что динамическая ошибка САРТ будет минимальна.

### **5.5 Исследование действия возмущений на выходную координату без применения системы автоматического регулирования температуры в зоне резания**

При разомкнутой САРТ на систему действуют некомпенсированные возмущения.

На электропривод главного движения станка действуют следующие возмущения:

- 1) колебания сетевого напряжения  $\Delta U_C = 0,3 \cdot U_{Cmin}$ ;
- 2) изменение сопротивления цепи статора и ротора  $\Delta R'_2 + \Delta R_l = 0,25 \cdot (R'_{20} + R_{l0})$ ;
- 3) изменение момента сопротивления  $M_{II}$ .

При диапазоне регулирования 3:1 отклонение выходной координаты – угловой частоты вращения вала двигателя привода главного движения – составляет 30% от заданного значения (параграф 5.2.2.4).

Отклонение угловой частоты привода главного движения вызывает пропорциональное отклонение температуры в зоне резания, то есть на 30% от заданного значения.

На привод подачи действуют следующие возмущения:

- 1) колебания сетевого напряжения  $\Delta U_C = 0,3 \cdot U_{Cmin}$ ;
- 2) изменение момента сопротивления  $\Delta M_{СП}$ ;
- 3) изменения сопротивлений цепи якоря  $\Delta R_{ЯЦ} = 0,25 \cdot R_{ЯЦ0}$  и обмоток возбуждения  $\Delta R_B = 0,25 \cdot R_{B0}$ .

При совместном действии возмущений на привод подачи отклонение скорости подачи  $v_{II}$  может вызывать изменение величины подачи  $s$  на 30%, что также вызывает отклонение температуры в зоне резания на 12% (параграф 5.2.3).

На процесс резания действует возмущение – отклонение глубины резания  $\Delta t$ . Например, при изменении на 10% от  $t_0$  происходит изменение температуры в зоне резания на 5% от заданного значения (параграф 5.2.1).

Таким образом, совместное действие всех возмущений может вызвать отклонение температуры в зоне резания на (45-50)% от заданного значения.

Расчеты и исследования, проведенные на модели, подтверждают необходимость применения САРТ.

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

В параграфе 1.1 констатируется, что повышение эффективности производства заключается в сокращении издержек при изготовлении изделий. Повышение эффективности процесса резания при лезвийной обработке на токарных станках реализуется за счет сокращения издержек на изготовление деталей.

Несоблюдение критериев управления процессом резания вызывает увеличение издержек.

1. При несоблюдении критерия поддержания оптимальной температуры, издержки обусловлены следующим:

– невозможностью стабильно получать высокие показатели качества поверхности детали (остаточные напряжения, глубину и степень наклепа,

параметры шероховатости) ввиду отсутствия средств контроля режимов в процессе резания;

- избыточными затратами времени на переналадку инструмента в связи с ускоренным его износом;

- избыточным расходом дорогостоящих инструментальных материалов.

Температура в зоне резания в процессе обработки детали может отклоняться от заданного оптимального значения на (45-50)% в результате совместного действия возмущений (параграф 5.5).

Для оценки эффективности процесса лезвийной обработки при управлении по критерию поддержания оптимальной температуры в зоне резания дана количественная оценка зависимости показателей эффективности процесса резания от изменения температуры в зоне резания (таблица 5.7). Данная таблица составлена на основании исследований, проведенных Макаровым А. Д. [42].

Отклонение температуры резания относительно оптимального значения на  $\pm 30\%$  вызывает изменение поверхностного относительного износа инструмента на 300-1500%.

При увеличении температуры резания относительно заданного оптимального значения только на 11% количество деталей, обработанных за одну настройку инструмента, уменьшается на 73%, а при уменьшении температуры всего на 28% количество деталей уменьшается на 40%.

Температура резания также влияет на глубину и степень наклепа. Так при увеличении температуры резания на 11% степень наклепа увеличивается на 8%, а глубина наклепа – на 21%. При уменьшении температуры резания на 37,5% степень наклепа увеличивается на 35%, а глубина – на 86%. Относительно этого можно сказать, что неравномерность степени наклепа вызывает существенное изменение качества деталей.

Остаточные напряжения при увеличении температуры на 16% возрастают на 3%, а при снижении температуры на 30% от заданного значения, остаточные напряжения уменьшаются на 91%.

Таблица 5.7 – Количественная оценка влияния отклонения температуры в зоне резания на показатели эффективности процесса лезвийной обработки металла

Отклонение температуры в зоне резания от заданного оптимального значения	Количественная оценка изменения показателей эффективности процесса резания				
	Поверхностный относительный износ инструмента	Число деталей, изготовленных за одну настройку инструмента	Степень наклепа	Глубина наклепа	Максимальные остаточные напряжения
$\Delta\theta, \%$	$\Delta h_{O3}, \%$	$\Delta N_{шт}, \%$	$\Delta N_{\%}, \%$	$\Delta h_c, \%$	$\Delta\sigma_{0max}$
+30	+1500				
-30	+300				-91
+11		-73	+8	+21	
-28		-40			
-37,5			+35	+86	
+16					+3

Таким образом, отклонение температуры в зоне резания от оптимального значения даже в небольшом диапазоне негативно влияет на ход процесса резания, так как вызывает существенное изменение параметров, характеризующих качество обработанной поверхности и инструмента, что увеличивает издержки, а, следовательно, снижает эффективность процесса лезвийной обработки.

2. При несоблюдении стабильности температуры в зоне резания при форсированных режимах резания и высокоскоростной обработке металла издержки лезвийной обработки увеличиваются за счет назначения заниженных режимов резания с целью предотвращения перегрева инструмента и выхода из строя оборудования и др.

Оценка эффективности процесса лезвийной обработки по критерию максимальной производительности может быть сделана по материалам выставки «Металлообработка 2008», проведенной в Москве. Ступинское предприятие ОАО «НПП «Аэросила»» показало примеры получения алюминиевых деталей из

цельной заготовки при обычной и высокоскоростной обработке (ВСО). В качестве примера представлены результаты обработки двух деталей из алюминиевого сплава: корпуса регулятора (таблица 5.8) и корпуса преобразователя (таблица 5.9). Обе детали обрабатывались на станке MAZAK Variaxes 630-5x при помощи инструментов фирм Sandvick, Seco и Horn.

Как видно из таблиц 5.8, 5.9, при высокоскоростной обработке трудоемкость, время изготовления деталей и другие показатели снизились в несколько раз по сравнению с обработкой на обычных режимах. Сопоставление показателей эффективности свидетельствует также о значительном снижении себестоимости продукции. Это подтверждает целесообразность назначения форсированных режимов при стабилизации температуры на заданном уровне.

Таблица 5.8 – Корпус регулятора

Показатель эффективности	Обычная обработка	ВСО
Цикл изготовления (ч)	480	80
Трудоемкость (н.-ч)	180	10
Количество типов применяемого оборудования (шт.)	15	2
Количество технологов для разработки технологического процесса (чел.)	4	1
Трудоемкость разработки технологического процесса (чел.-ч)	320	80

Таблица 5.9 – Корпус преобразователя

Показатель эффективности	Обычная обработка	ВСО
Цикл изготовления (ч)	120	32
Трудоемкость (н.-ч)	37	5
Количество типов применяемого оборудования (шт.)	5	2
Количество технологов для разработки технологического процесса (чел.)	3	1
Трудоемкость разработки технологического процесса (чел.-ч)	80	30

3. При управлении процессом резания по критерию стабилизации заданной энергоэффективности отклонение температуры в зоне резания от заданного значения вызывает избыточный расход энергии на единицу изготовленной продукции, что повышает издержки производства.

При анализе эффективности процесса лезвийной обработки по данному критерию в работе исследована взаимосвязь энергоэффективности процесса резания, температуры в зоне резания с параметрами режима резания. Для определения показателя энергоэффективности процесса резания для конкретных условий обработки предлагается использовать методику, описанную в параграфе 5.2.1.5. В частности, для режима, обеспечивающего поддержание оптимальной температуры для вычислительного эксперимента, проведенного в данной работе соответствует показатель энергоэффективности  $K_{ЭФ}=8,61 \text{кН}\cdot\text{мм}/\text{мм}^3$ . При отклонении температуры от заданного оптимального значения показатель энергоэффективности будет изменяться, что вызывает дополнительные издержки.

В случаях, когда требуется производить процесс резания при форсированных режимах, увеличивается скорость резания, растет температура в зоне резания и повышается энергоэффективность процесса резания.

Анализ количественной оценки влияния отклонения температуры резания от заданного значения на показатели эффективности процесса лезвийной обработки металла доказывает целесообразность применения САРТ для стабилизации температуры в зоне резания с целью повышения эффективности процесса лезвийной обработки.

Чтобы достичь высоких показателей эффективности лезвийной обработки, САРТ должна отвечать достаточно высоким требованиям. Например, в исследованиях, проведенных Зориктуевым В. Ц. [21] рекомендуются следующие требования к САР. На установившихся режимах погрешность управления (статическая точность) должна составлять: для температуры резания – не более 2% (исходя из допустимых колебаний интенсивности износа режущего инструмента менее 50%, наклепа не более 10%, снижения жаропрочности не

более 2%, шероховатости – менее 10%, длительной прочности – не более 5%, предела усталости – не более 1%); для силовых координат – не более 5% (определяется в основном «запасом» при назначении уставок и погрешностями используемых датчиков силовых параметров). Достаточно высокие требования предъявляются и к переходным режимам САР, вызванных действием как задающих, так и возмущающих воздействий. Требования к быстродействию системы зависят от конкретной специфики механообрабатывающего производства и используемых скоростей обработки металлов. В условиях тенденции к созданию технологического оборудования с высокими скоростями движения (например, в станочных модулях скорости резания могут достигать 1500 – 2000 м/мин) быстродействие должно быть достаточным, чтобы обеспечить допустимую динамическую ошибку не более 2-5%.

Точность регулирования температуры в зоне резания при помощи предложенной в работе САР определяется двумя факторами: точностью исполнительной системы и точностью измерителя температуры.

В связи с этим, для повышения точности исполнительной системы использованы САР промежуточных координат с регуляторами на основе интеграторов, компенсирующие действие возмущений. Это позволяет добиться наивысшей точности в статических режимах управления и регламентировать ошибку регулирования в динамических режимах. То есть, задание режимов работы системой УУ исполняется с точностью измерительных устройств.

Измеритель температуры построен на основе предлагаемой в данной работе модели процесса резания. В модели процесса резания учтен расход энергии, поступающей в нагреваемое тело и отдаваемой им. Это обеспечивает высокую точность определения температуры в зоне резания.

Современными исследованиями ученых достаточно точно обоснован выбор режимов резания, обеспечивающих заданную температуру в зоне резания. При задании режимов резания САР автоматически при помощи ИВК находит выходное напряжение, соответствующее заданным режимам резания,

эквивалентное заданной температуре в зоне резания. Точность поддержания этого напряжения – заданного значения температуры в зоне резания – обеспечивается структурой и выбором регуляторов САРТ. Поэтому 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. В таком случае точность регулирования состояния технологического процесса – регулирования параметров режима процесса резания – обусловлена классом точности датчиков. Наличие интегрального регулятора обеспечивает нулевое значение статической ошибки регулирования. САРТ будет поддерживать состояние процесса резания независимо от возмущений.

### **Выводы по главе 5**

1. Разработана система управления лезвийной обработкой металлов на основе определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии привода главного движения (САРТ).

2. Выбрано оборудование, составлены имитационные модели оборудования и САРТ в пакете прикладных программ SIMULINK MATLAB.

3. Произведен анализ и синтез локальных САР.

4. Исследованы статические и динамические характеристики элементов САРТ.

5. Исследовано влияние возмущений каждого элемента САРТ на соответствующую выходную координату.

6. С целью исключения отклонения выходных координат под действием возмущений в статических режимах в локальных САР применены регуляторы, построенные на основе интеграторов.

7. Установлена связь температуры в зоне резания с управляющим воздействием привода главного движения.

8. На имитационной модели системы «электропривод главного движения – станок» исследованы регулировочные характеристики зависимости температуры в зоне резания от управляющего воздействия электропривода. Произведено сопоставление характеристик, полученных на модели с натурными. Графики зависимости температуры от скорости резания при различных значениях подачи, полученные на имитационной модели и на реальной установке, имеют качественную сходимость.

9. Выявлены особенности регулировочных характеристик зависимости температуры в зоне резания от скорости резания. Установлена причина нелинейности регулировочных характеристик.

10. Дана количественная оценка повышения эффективности лезвийной обработки металлов на токарных станках за счет применения САРТ.

## 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 износ 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 КЭФ для оптимального режима резания составляет  $8,61 \text{ кН} \cdot \text{мм} / \text{мм}^3$ .

### Список литературы

1. Абакумов, А. М. Алгоритмизация процесса продольного точения / А. М. Адаменко, Ю. И. Видманов, В. Н. Михелькевич // Станки и инструмент. – 1972. – №9. – С. 20-22.
2. Адаменко, В. М. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования / В. М. Адаменко, Ж. А. Мрочек // Наука и техника. – 2012. – №4. – С. 3-6.
3. Барвинок, В. А. Методы экспериментальных исследований технологических процессов в производстве летательных аппаратов [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / В. А. Барвинок, Ю. А. Вашуков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,25 Мбайт). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
4. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.— 392 с.
5. Безъязычный, В. Ф. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Часть первая / В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов, В. А. Полетаев и др.; Под ред. В. Ф. Безъязычного и В. Н. Крылова. – М.: Машиностроение, 2005. – 560 с.
6. Безъязычный, В. Ф. Технологическое обеспечение комплекса параметров качества поверхностного слоя и точности обработки на стадии технологической подготовки производства / В. Ф. Безъязычный // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – №3. – С. 3 – 11.
7. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Спб.: Профессия, 2007. – 752 с.
8. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344с.

9. Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
10. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: 2004. – 365 с.
11. Гозман, Я. Б. Исследование передаточной функции процесса резания как звена адаптивной системы / Я. Б. Гозман, Ю. Д. Пиковский // Станки и инструмент. – 1974. – №8. – С. 10-12.
12. ГОСТ 16530-83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения. – Взамен ГОСТ 16530-70; введ. 1984-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 50 с.
13. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
14. ГОСТ Р 54430-2011. Оборудование металлообрабатывающее и деревообрабатывающее. Показатели энергоэффективности. Номенклатура. Методы определения и нормирования значений. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 19 с.
15. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
16. Григорьев, С. Н. Управление процессом резания по мощности привода станка / С. Н. Григорьев, М. В. Терешин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №4-6. – С.7-10.
17. Зориктуев, В. Ц. Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания / В. Ц. Зориктуев // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12, №4. – С. 14–19.

18. Зориктуев, В. Ц. Автоматизация технологических процессов и производств / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Загидуллин, А. Г. Лютов, Ю. А. Никитин, А. Г. Схиртладзе. – М.: Машиностроение, 2008. – 428 с.

19. Зориктуев, В. Ц. Идентификация и автоматическое управление технологическими процессами в станочных системах: Учебное пособие / В. Ц. Зориктуев. – Уфа: УГАТУ, 1992. – 118 с.

20. Зориктуев, В. Ц. Основы автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении: Учеб. пособие для студентов технических вузов / В. Ц. Зориктуев, Н. С. Буткин, А. Г. Схиртладзе, А. Г. Лютов, Ю. А. Никитин; Под общ. ред. В. Ц. Зориктуева, Н. С. Буткина. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2000. – 406с.

21. Зориктуев, В. Ц. Повышение эффективности обработки деталей из труднообрабатываемых материалов на станках путем идентификации и автоматического управления температурно-силовым режимом точения: дис. д-ра. техн. наук: 05.13.06 / В. Ц. Зориктуев. – М., 1990. – 418 с.

22. Зубков, В. А. Энергоемкость процесса как критерий оптимизации / В. А. Зубков, Д. Л. Скуратов, В. Н. Трусов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2006. – №2-2. – С.375-377.

23. Исаев, Ш. Г. Разработка системы автоматического управления силами резания по электрической проводимости контакта "инструмент деталь": дис. канд. техн. наук: 05.13.07. – Уфа, 1987. – 235 с.

24. Кабышев, А. В. Электроснабжение объектов. Ч. 1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учеб. пособие / А. В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2007. – 185 с.

25. Карпов, А. В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твердых тел / А. В.

Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – №1. – С.37-49.

26. Карпов, А. В. Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – №1. – С. 58-63.

27. Каталог продукции ВЭМЗ-Спектр [электронный ресурс]. URL: <http://www.strakt.ru/static/katalog-ruselprom.pdf> (дата обращения: 19.09.2016).

28. Кишуров, В. М. Резание материалов. Режущий инструмент: учеб. пособие / В. М. Кишуров, П. П. Черников; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2004. – 268 с.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

35. Курченко, А. И. Влияние вида контактного взаимодействия на температуру резания при точении титановых сплавов / А. И. Курченко, С. И. Кормилицын, И. А. Стребков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – 11 (173). – С. 41-46.

36. Лазуткина, Н. А. Активные формы энергосбережения в машиностроении [электронный ресурс] / Н. А. Лазуткина // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2013. – №2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8906> (дата обращения 19.09.2016).

37. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе // – М.: Машиностроение, 1982. — 320 с.

38. Лютов, А. Г. Анализ оборудования канала удаления газов в водогрейном котле с уравновешенной тягой как элементов системы автоматического управления / А. Г. Лютов, М. Ю. Озеров, Г. Н. Коуров, А. И. Ямаев, А. А. Гайнцев // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №2. – С. 106 – 113.

39. 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.

40. 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.

41. Лютов, А. Г. Система автоматического регулирования напора дымососа водогрейного котла с уравновешенной тягой / А. Г. Лютов, М. Ю. Озеров, Г. Н. Коуров, А. И. Ямаев, А. А. Гайнцев // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15, №2. – С. 132 – 139.

42. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

43. Марочник стали и сплавов [электронный ресурс]. URL: [http://www.splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://www.splav-kharkov.com/choose_type.php) (дата обращения 19.09.2016).

44. Месягутов, И. Ф. Адаптивная система управления процессом точения / И. Ф. Месягутов, А. Д. Никин // Технология металлообработки: физика процессов и оптимальное управление: Тез. докл. международной конференции. Часть 1. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 1994. – С. 191.

45. Мухин, В. С. Качество поверхностного слоя при механической обработке жаропрочных сплавов и влияние его на эксплуатационные свойства материалов и деталей авиационных двигателей: автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.07.05 / В. С. Мухин. – МАИ, 1975. – 35 с.

46. Мухин, В. С. Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД / В. С. Мухин. – М.: Наука, 2005. – 296 с.

47. Никин, А. Д. Адаптивная система управления температурно-силовыми режимами процесса резания металлов: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / А. Д. Никин. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1999. – 194 с.

48. Новатор. Металлообрабатывающие станки из Европы. Токарный с ЧПУ 16K20Ф3 [электронный ресурс]. URL: <http://www.novator-grp.ru/rus/stanki-ussr/16K20F3/> (дата обращения 19.09.2016).

49. План выставок по энергоресурсосбережению на 2015 год // Торгово-промышленная палата Ярославской области: сайт. URL: [http://www.yartpp.ru/index.php?id=191&Itemid=122&lang=ru&option=com\\_content&view=article](http://www.yartpp.ru/index.php?id=191&Itemid=122&lang=ru&option=com_content&view=article) (дата обращения 19.09.2016).

50. Плотников, А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ. / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. – Волгоград: Государственный технический университет, 2003. – 184с.

51. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов / Н. С. Жучков, П. А. Беспяхотный, А. Д. Чубаров и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 153с.

52. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

53. Полетаев, А. Проблема энергосбережения в России [электронный ресурс] / А. Полетаев // Svetozone.ru: светотехнический портал. URL: [http://www.svetozone.ru/info/articles/articles\\_38.html](http://www.svetozone.ru/info/articles/articles_38.html) (дата обращения 19.09.2016).

54. Постнов, В. В. Оптимизация термодинамических условий нестационарного резания труднообрабатываемых материалов / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9., №1 (19). – С. 100-107.

55. Постнов, В. В. Разработка эволюционной модели изнашивания режущего инструмента для управления процессом обработки / В. В. Постнов, А. А. Шафиков // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т.11, №2 (29). – С.139–146

56. Постнов, В. В. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием / В. В. Постнов, В. Л. Юрьев.— М.: Машиностроение, 2009.— 269 с.

57. Преобразователь частоты RI100 [электронный ресурс]: каталог применения. URL: <http://www.электродвигатели-редукторы.рф/images/ruselcom/catalogue-ri100.pdf> (дата обращения 19.09.2016).

58. 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.

59. Райзберг, Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 479 с.

60. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

61. Река, Н. Г. Динамическая модель канала управления температурой в зоне резания металла при токарной обработке / Н. Г. Река, Г. Н. Коуров, А. Г. Лютов // СТИН. – 2015. – №7. – С. 35-40.

62. 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.

63. Река, Н. Г. Измерение температуры в зоне резания металла при токарной обработке/ Н. Г. Река, Г. Н. Коуров, А. Г. Лютов // СТИН. – 2015. – №7. – С. 31-35.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. Силин, С. С. Автоматическое управление процессом резания / С. С. Силин, В. В. Трусов, В. В. Яхонтов // Станки и инструмент. – 1971. – № 1. – С. 13-14.

68. Силин, С. С. Аналитическое определение оптимальной температуры резания / С. С. Силин, Д. В. Масляков // СТИН. – 2003. – №6. – С.35-37.

69. Смыслов, А. М. К вопросу назначения оптимальных режимов при обработке труднообрабатываемых материалов. Пути повышения производительности и качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала: / А. М. Смыслов, В. М. Кишуров // Тез. докл. зональной научн.-техн. конф. – Свердловск, 1984. – С. 81-82.

70. Смыслов, А. М. К вопросу назначения режимов резания при точении титановых сплавов. Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов / А. М. Смыслов, Г. А. Кулаков, В. М. Кишуров. // Межвуз. научн. Сб., Вып.4, - Уфа, 1979. – С. 28-33.

71. Смыслов, А. М. Экспериментально-расчетное определение оптимальных режимов резания при точении титанового сплава. Вопросы оптимального резания металлов: / А. М. Смыслов, В. М. Кишуров, Ю. В. Никитин // Межвуз. научн. Сб. - вып. 1. - Уфа, 1976. - С. 12-17.

72. Солодков, В. А. Контактное взаимодействие и температура при врезании / В. А. Солодков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – 11 (173). – С. 39-41.

73. Соломенцев, Ю. М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

74. Солоненко, В. Г. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие для вузов / В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 414 с.

75. Способ бесконтактного определения температуры в зоне резания при механической обработке: пат. 2398659 Рос. Федерация: МПК В 23 В 25/06, G 01 N 3/58 / Афанасьев К. В., Швецов И. В., Щеголев В. А.; патентообладатель Новгор. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – № 2009104639/02; заявл. 11.02.09; опубл. 10.09.10, Бюл. №25.

76. Способ и устройство стабилизации процесса резания на токарном оборудовании с ЧПУ: заявка 2010134471 Рос. Федерация: МПК В 23 В 25/00 / Бобырь М. В.; заявитель Юго-Западный гос. ун-т. – № 2010134471/02; заявл. 17.08.10; опубл. 27.02.12.

77. Способ измерения температуры режущей кромки лезвийного инструмента при высокоскоростном фрезеровании металла: пат. 2445588 Рос. Федерация: МПК G 01 K 7/02 / Болсуновский С. А., Вермель В. Д., Зиняев В. В. и др.; патентообладатель Центр. аэрогидродинамич. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковского. – № 2010147282/28; заявл. 19.11.10; опубл. 20.03.12.

78. Способ определения величины температурного поля, температуры в зоне резания и характера ее распределения в обрабатываемом материале: заявка 2005110736 Рос. Федерация: МПК G 01 K 7/04 / Хапачев Б. С.; заявитель Кабардино-Балкар. гос. ун-т им. Х. М. Бербекова. – № 2005110736/28; заявл. 12.04.05; опубл. 20.10.06.

79. Способ определения составляющих силы резания на токарных станках с ЧПУ: заявка 97116947 Рос. Федерация: МПК В 23 В 25/06, В 23 В 1/00 / Плотников А. Л., Еремеев В. В.; заявитель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 97116947/02; заявл. 14.10.97; опубл. 27.02.99.

80. 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.

81. Способ определения температуры контактного взаимодействия при трении и резании: пат. 2124707 Рос. Федерация: МПК G 01 K 7/02, G 01 K 13/04 / Корндорф С. Ф., Плахова Е. В.; заявитель и патентообладатель Орлов. гос. техн. ун-т. – № 97105804/28; заявл. 09.04.97; опубл. 10.01.99.

82. Способ определения эффективных режимов токарной обработки детали: заявка 2009136217 Рос. Федерация: МПК В 23 В 1/00 / Горелов В. А., Черкасова Н. Ю., Яковлев М. Г.; заявитель Моск. машиностр. производств. предприятие "САЛЮТ". – № 2009136217/02; заявл. 01.10.09; опубл. 10.04.11.

83. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т.; справочник / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. Изд. 5-е. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – Т.2. — 944 с.

84. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.

85. Старков, В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

86. Старков, В. К. Оптимизация процесса резания по энергетическим критериям / В. К. Старков, М. В. Киселев // Вестник машиностроения. – 1989. – №4. – С.41-45.

87. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов. / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640с.

88. Таратынов, О. В. Влияние режима резания на контактную температуру и стойкость инструмента/ О. В. Таратынов // СТИН. – 2004. – №11. – С.30–32.

89. Тверской, М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.

90. Теория автоматического управления: учеб. для машиностроит. спец. вузов / В. Н. Брюханов, М. Г. Косов, С. П. Протопопов и др.; Под ред. Ю. М. Соломенцева. – 3-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 268 с.

91. Теплоемкость стали // Thermalinfo.ru: сайт. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/teploemkost-stali> (дата обращения 19.09.2016).

92. Терешин, М. В. Оперативное регулирование процесса резания в технологических системах металлообработки / М. В. Терешин, О. А. Кулагин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2013. – №2 (25). – С. 25-30.

93. Торгово-промышленное объединение Электромашкомплект. Электродвигатели постоянного тока 4ПНМ, 4ПБМ [электронный ресурс]. URL: <http://motors33.ru/elektrodvigateli-postoyannogo-toka-4pnm-4pbm.html> (дата обращения 19.09.2016).

94. Устройство для измерения температуры металла при обработке поверхности резания: пат. 91425 Рос. Федерация: G 01 K 7/00 / Бутенко В. И., Гусакова Л. В., Фоменко Е. С.; патентообладатель Южный федер. ун-т. – № 2009131922/22; заявл. 24.08.09; опубл. 10.02.10.

95. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

96. Электроприводы постоянного и переменного тока. Электроаппаратура. Преобразователи унифицированные трехфазные тиристорные серии ЭПУ1М [электронный ресурс]. URL: <http://www.elmotor.ru/pst1100.html> (дата обращения 19.09.2016).

97. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. (гл. ред. А. И. Попов). – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.

98. Юрьев, В. Л. Автоматизация определения оптимальных параметров при нестационарных условиях резания / В. Л. Юрьев. // Отраслевая библиотека

авиационной промышленности «Технический прогресс и повышение квалификации». – М., 1992. – 144с.

99. Dirikolu, M. H. Modelling requirements for computer simulation of metal machining Text. / M. H. Dirikolu, T. H. Childs // Turk. J. Engin. Environ. Sci.– 24 (2000) - P. 81-83.

100. Halil, B. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models Text. / B. Halil, E. Kilic, A. Erman Tekkaya // Int. J. of Machine Tools & Manufacture № 44 (2004) - P. 933-944.

101. Lazoglu, I. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining / I. Lazoglu, Y. Altintas // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2002. №42. P. 1011-1022.

102. Luo, X. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting / X. Luo, K Cheng, R. Holt, X. Liu // 15th International Conference on Wear of Materials. 2005. Vol. 259. P. 1235-1240.

103. Ozel, T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting / T. Ozel, T. Altan // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. №40. P. 133-152.

104. Ozel, T. Modeling of high speed machining processes for predicting tool forces, stresses and temperatures using FEM simulations / T. Ozel, T. Altan // Proceedings of the CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 1998. May 19. P. 225-234.

105. Ozel, T. Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining Text. / T. Ozel, E. Zeren // Int. J. Adv. Manuf. Technologies Springer-Verlag, London, 2006.

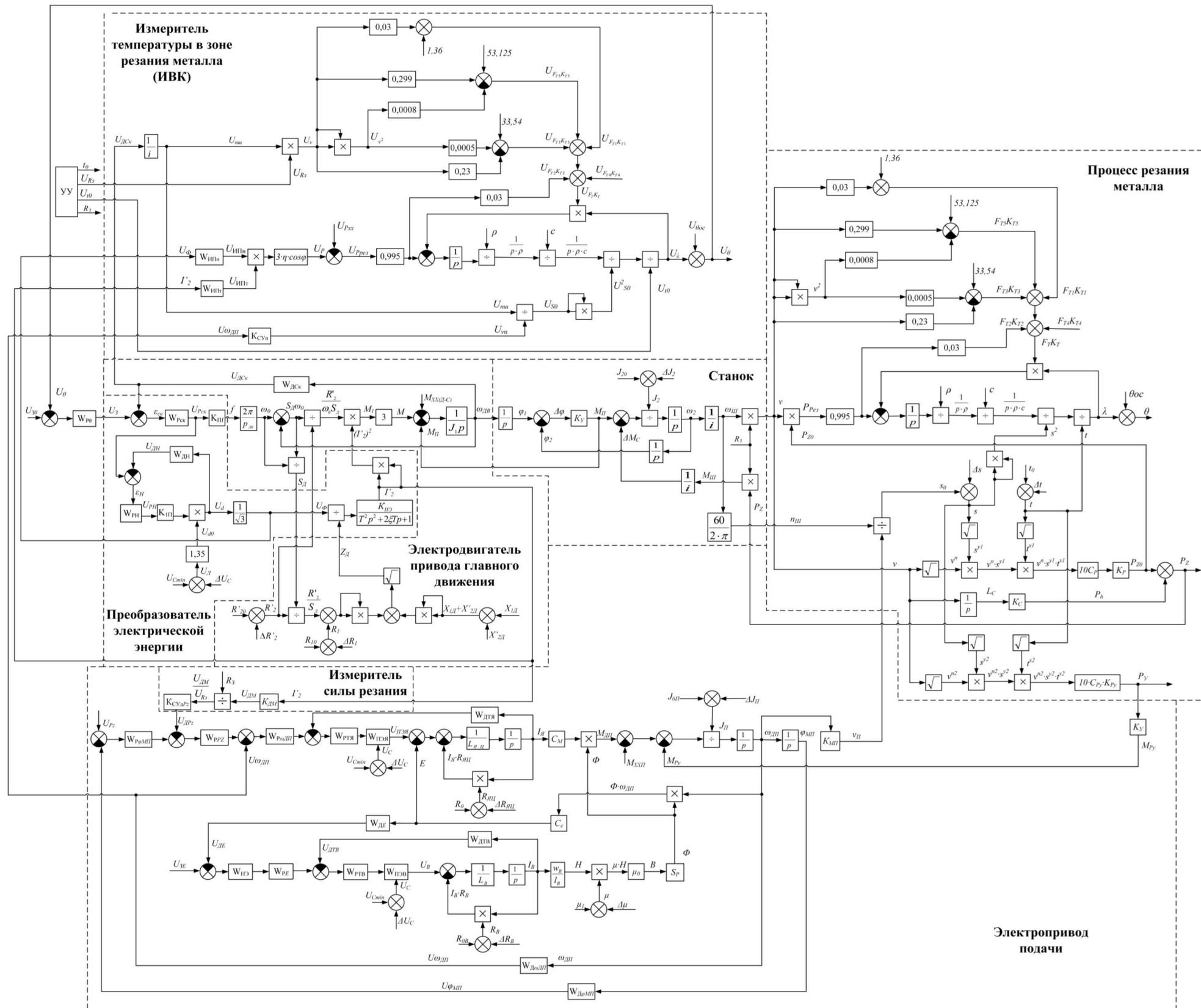
106. Reka, N. G. Temperature control channel in the metal-cutting zone / N. G. Reka, G. N. Kourov, A. G. Lyutov // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 2. – pp. 163-167.

107. 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.

108. Yen, Y.-C. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis/ Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan // Journal of Materials Processing Technology. 2004. №146. P. 82-91.

Приложение А  
(Обязательное)

Структурная схема системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла



## Приложение Б

(Справочное)

## Патенты, акты внедрения, дипломы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2585917

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ  
РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014148819

Приоритет изобретения 03 декабря 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 11 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 03 декабря 2034 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael



## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
Уфимского государственного  
авиационного технического  
университета, д-р физ.-мат. наук,  
профессор

Зарипов Н. Г.

2016 г.



## АКТ

о реализации результатов кандидатской диссертации  
**РЕКА Надежды Георгиевны** на тему «Система управления лезвийной обработкой  
металлов на основе определения температуры в зоне резания по расходу  
электроэнергии»

Комиссия в составе представителей Уфимского государственного авиационного технического университета: д. т. н., профессора Лютова А. Г. – заведующего кафедрой автоматизации технологических процессов, к. т. н., доцента Коурова Г. Н. – заместителя заведующего кафедрой автоматизации технологических процессов по учебной работе, к. т. н., доцента Гончаровой С. Г. – доцента кафедры автоматизации технологических процессов констатирует, что результаты диссертационной работы Река Н. Г. внедрены в учебный процесс кафедры автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» в виде методических указаний к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления технологическими процессами». Методические указания предназначены для использования при выполнении курсовой работы, выпускной квалификационной работы бакалавров, а также для использования при проведении научно-исследовательских работ и выпускной квалификационной работы магистрантов по направлению подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств».

Зав. каф. АТП  
д. т. н., профессор

А. Г. Лютов

Зам. зав. каф. АТП  
к. т. н., доцент

Г. Н. Коуров

Доцент каф. АТП  
к. т. н., доцент

С. Г. Гончарова



«БАШКОММУНЭНЕРГО»  
 ысым акционерлар йәмғиәте  
 450005, Өфө ҡалаһы, Октябрьен 50  
 Һаһлыҡ урамы, 11/2  
 Тел.: (347) 272-33-67  
 Факс: (347) 272-76-31  
 E-mail: baskomener@bk.ru  
<http://bke.newmail.ru>



Открытое акционерное общество  
 «БАШКОММУНЭНЕРГО»  
 (ОАО «БАШКОММУНЭНЕРГО»)  
 450005, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 11/2  
 Тел.: (347) 272-33-67  
 Факс: (347) 272-76-31  
 E-mail: baskomener@bk.ru  
<http://bke.newmail.ru>

№ \_\_\_\_\_  
 На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
 г \_\_\_\_\_ 1

### АКТ

о реализации результатов диссертационной работы

**РЕКА Надежды Георгиевны**

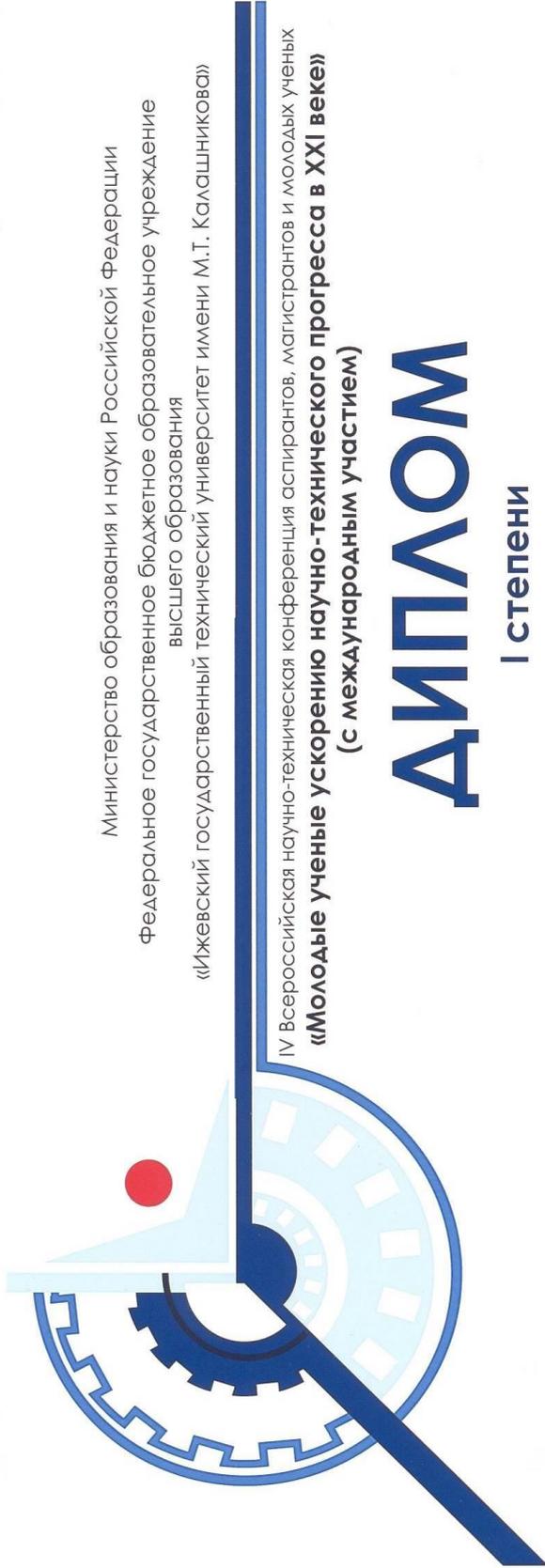
на тему: «Система управления лезвийной обработкой металлов на основе определения температуры в зоне резания по расходу электроэнергии»

Настоящим подтверждается, что диссертационная работа Река Н. Г. по своему содержанию рассматривает вопросы производственного характера, свойственные предприятию ОАО «Башкоммунэнерго».

Использование разработанной системы автоматического регулирования температуры в зоне резания металла позволяет при производстве паровых и водогрейных котлов производить обработку металлов при оптимальной температуре, при заданном значении энергоэффективности, либо производить высокоскоростную лезвийную обработку, при этом обеспечивается стабилизация заданных показателей качества обрабатываемых деталей, стабилизация энергоэффективности, повышение производительности обработки, появляется возможность избежать поломку инструмента и выхода из строя технологического оборудования, что в конечном итоге приводит к повышению надёжности выпускаемой продукции.

Генеральный директор  
 ОАО «Башкоммунэнерго» Р. А. Гареев





Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

IV Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых  
 «Молодые ученые ускорению научно-технического прогресса в XXI веке»  
 (с международным участием)

# ДИПЛОМ

I степени

ПРИСУЖДАЕТСЯ

**Реке Н. Г.**  
 аспиранту

с докладом на тему:

**«Модель измерителя выходной координаты системы автоматического  
 регулирования температуры в зоне резания металла»**

научный руководитель: д.т.н., профессор, Лютов А.Г.

ФГБОУ ВПО «УГАТУ»



*А.Г. Лютов*



Ижевск, 20-21 апреля, 2016 г.