

*На правах рукописи*



**Бирюков Сергей Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРЯМОЗУБЫХ  
КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ В СОСТАВЕ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

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

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Волков Андрей Эрикович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Официальные оппоненты: **Чепчуров Михаил Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Калякулин Сергей Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Защита состоится «25» июня 2024 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», [www.stankin.ru](http://www.stankin.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.332.02  
д.ф.-м.н., доцент



Елисеева Юлия Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Зубчатые передачи имеют важное значение для автомобильной, горнодобывающей, судостроительной и авиационной промышленности и обладают большой трудоёмкостью проектирования и изготовления. Прямозубые конические передачи широко используются во многих машинах и механизмах, например, в дифференциале заднего моста автомобиля, трактора и другой сельхозтехнике.

Традиционно зубчатые передачи изготавливаются резанием и обрабатываются резцами или фрезами путем съема металла с заготовки методами копирования или обкатки. К современным способам относятся обработка на станках с ЧПУ и прецизионная штамповка. По сравнению с обработкой резанием штамповка обладает преимуществами, к которым относится повышение производительности, снижение металлоёмкости и больший ресурс отштампованных зубчатых колёс по сравнению с зубчатыми колесами, полученными резанием.

На этапе технологической подготовки производства выбор технологических параметров обработки зубчатых передач с приближённым зацеплением и точечным контактом является важной задачей. С одной стороны, передача должна быть нечувствительна к погрешностям изготовления, сборки и эксплуатации, с другой – она должна передавать заданную нагрузку и обеспечивать требуемую точность передачи вращения.

Для минимизации влияния погрешностей применяется локализация контакта в зубчатой передаче. С этой целью боковую поверхность зуба модифицируют за счёт введения профильного и продольного отводов боковой поверхности зубьев одного из колес пары.

Локализация контакта в прямозубых конических передачах осуществлялась за счёт расчёта наладок станка либо геометрии инструмента. Для изготовления прямозубых конических передач более современными способами, к которым относится штамповка и изготовление на станках с ЧПУ, требуется расчёт 3D-моделей зубчатых колёс с локализованным контактом. Остаётся нерешённым вопрос получения универсальной математической модели модифицированного зацепления со строгим решением задачи локализации пятна контакта в прямозубых конических передачах, позволяющей получить 3D-модель модифицированных зубчатых колёс. Кроме этого, существующие методики расчёта характеристик контакта под нагрузкой в прямозубых конических передачах не подходят для использования в алгоритмах оптимизации.

При обработке резанием зубчатых колёс припуск на обработку в основном оставляют равномерным. Для изготовления зубчатых колёс новыми способами обработки, в частности методом штамповки в закрытом штампе, нужно другое распределение припуска. Для этого требуется математическая модель, позволяющая моделировать распределение припуска под финишную обработку и сравнивать количество металла в заготовке с припуском и готовом колесе.

В этой связи актуальной задачей является разработка метода и средств поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач и встраивание их в автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП) конических зубчатых передач. Это позволит повысить качество технологической подготовки производства, сократить её сроки и обеспечить получение 3D-моделей зубчатых колёс с требуемым локализованным контактом и заготовок с припуском под финишную операцию штамповки.

**Степень разработанности исследования.** Первым, кто предложил использовать комбинированную – профильную и продольную – несопряжённость активных поверхностей зубьев для локализации контакта, был М. Baxter. Он показал, что кривая ошибок передачи вращения при профильной несопряжённости должна иметь вид параболы ветвями вниз.

Локализация контакта при обработке резанием достигается за счёт соответствующего расчёта наладочных параметров зубообрабатывающего оборудования. Наиболее полно задача локализации контакта решена в работах Ф.Л. Литвина, Г.И. Шевелевой, М.Г. Сегалья, В.И. Медведева, В.Н. Сызранцева для конических и гипоидных передач с круговым зубом, в работах Ф.Л. Литвина и С.А. Лагутина для цилиндрических косозубых передач, в работах С.А. Лагутина и А.И. Сандлера для червячных передач, в работах В.И. Гольдфарба и Е.С. Трубачева для спироидных передач и в работах Б.Ф. Федотова для глобоидных передач. Вопросы локализации контакта рассматривались в работах многих зарубежных ученых, таких как М. Baxter, H.J. Stadtfeld, V. Simon, H. Ding и др.

Методы локализации контакта ранее применялись при обработке прямозубых конических колёс на некоторых моделях станков. Под руководством Е.Г. Росливкера использовалась методика продольной локализации контакта на зубострогальном станке модели 5П23БП. В Саратовском СКБЗС осуществлялась обработка квазиэвольвентных прямозубых конических колес на станках моделей 5С267П и 5С277П спаренными дисковыми фрезами по схеме с неплосковершинным производящим колесом. Для регулировки степени локализации контакта Л.К. Семеновым и В.И. Прилепским был предложен специальный способ наладки. В Московском станкоинструментальном институте Г.И. Шевелевой и А.Э. Волковым была разработана программа расчета геометрии фрез-протяжек для обработки прямозубых конических колес методом кругового протягивания на станках моделей 5С268 и 5С269, а также представлена методика локализации контакта за счет варьирования геометрических параметров инструмента.

Однако на сегодняшний день отсутствует универсальный метод технологического синтеза прямозубых конических передач, который бы позволил получить локализованный контакт в передаче.

**Целью работы** является сокращение сроков технологической подготовки производства прямозубых конических передач и повышение качества шестерен за счёт разработки метода и программных средств технологического синтеза прямозубых конических передач, которые образуют подсистему в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП).

Для достижения поставленной цели и решения научной проблемы сформулированы следующие основные **задачи диссертационного исследования**:

1. Анализ автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки производства.
2. Разработка метода технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства, включающего математическую модель модифицированной прямозубой конической передачи, а также математическую модель распределения припуска под калибровку.
3. Разработка алгоритма решения задачи минимизации максимального контактного давления при условии отсутствия кромочного контакта за счёт варьирования параметров модификации.
4. Разработка комплекса методик, применяемых при взаимодействии с автоматизированной системой технологической подготовки производства. К ним относятся методики подбора значений параметров модификации для получения локализованного контакта, подбора значений параметров распределения припуска и технологического синтеза прямозубых конических передач.
5. Разработка средств поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства и экспериментальная проверка.

**Объектом исследования** является процесс технологической подготовки производства прямозубых конических передач.

**Предметом исследования** являются методы и средства поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач, применяемые в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства для снижения влияния погрешностей сборки, изготовления и эксплуатации.

**Научная новизна** в работе состоит:

1. В установлении связей между характеристиками зацепления и контакта в прямозубой конической передаче и параметрами технологического синтеза передачи на этапе технологической подготовки производства, особенностью которых является обеспечение локализованного контакта в передаче с целью снижения влияния погрешностей изготовления, сборки и эксплуатации.
2. В разработанном на основе установленных взаимосвязей методе технологического синтеза прямозубых конических передач, который является частью подсистемы в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства. Разработанный метод отличается возможностью получения трёхмерных моделей зубчатых колёс с требуемым локализованным контактом, проведения расчёта характеристик зацепления передачи под нагрузкой и получения трёхмерных моделей заготовок зубчатых колёс с требуемым распределением припуска для финишной операции штамповки.
3. В разработанном эвристическом алгоритме решения задачи условной оптимизации по выбору значений параметров модификации для получения локализованного контакта и минимизации максимального контактного

давления в зубчатой передаче. Отличительной особенностью алгоритма является то, что в алгоритме учитывается назначение параметров модификации.

**Теоретическая значимость исследования.** Разработанная в составе метода технологического синтеза прямозубых конических передач математическая модель модифицированного зацепления может быть использована в дальнейшем развитии теории зубчатых зацеплений. Предложенные параметры модификации геометрической модели зубчатых колёс могут быть использованы при разработке моделей других видов модифицированных зацеплений.

**Практическая значимость исследования** состоит в разработанном средстве поддержки технологического синтеза прямозубой конической передачи в составе АСТПП, которое включает:

1. Методику подбора параметров модификации для получения локализованного контакта.
2. Методику подбора значений параметров распределения припуска для финишной операции штамповки.
3. Методику технологического синтеза зубчатого зацепления.
4. Программное обеспечение подсистемы АСТПП, которое позволяет анализировать характеристики зацепления и контакта, рассчитывать модифицированные трёхмерные модели зубчатых колёс, проводить оптимизацию максимального контактного давления в передаче, рассчитывать трёхмерные модели заготовок с припуском под калибровку.

**Методология и методы исследований.** В процессе разработки теоретических положений использованы методы расчёта зубчатых зацеплений, аналитической и дифференциальной геометрии. При решении поставленных задач использовались численные методы решения уравнений (метод Ньютона, метод хорд, шаговый метод), методы численного интегрирования (метод Симпсона) и методы численного дифференцирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства.
2. Математическая модель модифицированного зубчатого зацепления в составе метода технологического синтеза прямозубых конических передач, отличительной особенностью которой является получение боковых поверхностей прямых зубьев в конической передаче с локализованным пятном контакта.
3. Эвристический алгоритм решения задачи условной оптимизации по подбору значений параметров модификации для минимизации контактного давления в передаче с локализованным контактом.
4. Математическая модель распределения припуска под финишную обработку зубчатых колёс.
5. Программное средство поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе подсистемы АСТПП.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе положений, результатов и выводов подтверждается согласованностью полученных

практических результатов с теоретическими, полученными с помощью разработанного метода технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства.

**Соответствие паспорту специальности.** Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, а именно п. 12 – «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».

**Апробация результатов исследования.** Материалы работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: всероссийской научно-практической конференции «Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал» (2017), международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии» (АИТ-2018), всероссийской научно-практической конференции «Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал» (2018), международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии» (АИТ-2019), всероссийской научно-практической конференции «Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал» (2019), международной научно-практической конференции «Наука сегодня: вызовы, перспективы и возможности» (2019), XIII всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации» (МТИ – 2020), VIII Международной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (2020), XIV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2021)», международном форуме «Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения» (2021), XV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2022)».

Отдельные результаты научно-исследовательской работы используются на ПАО «КАМАЗ», получен акт о внедрении отдельных результатов научно-исследовательской работы при подготовке производства прямозубых конических передач заднего моста автомобиля. 3D-модели зубчатых колёс, подготовленные с помощью разработанного программного средства, рекомендованы к внедрению на ПАО «КАМАЗ». Испытания штампованных зубчатых колёс, изготовленных по подготовленным 3D-моделям, дали положительные результаты.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (103 наименования) и приложений. Работа содержит 143 страницы сквозной нумерации, включая 70 рисунков, 9 таблиц и 4 страницы приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования диссертации, определяются основные задачи и научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён анализ существующих автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки производства конических передач, рассмотрены методы решения контактных задач, установлена необходимость разработки метода и программных средств технологического синтеза прямозубых конических передач.

Производство зубчатых передач характеризуется высокой трудоёмкостью, связанной с геометрическим и прочностным расчётом передачи, а также с её изготовлением. В ходе конструкторского синтеза прямозубой конической передачи получают её чертёж, в котором не регламентирована точная форма боковой поверхности зубьев. Рассмотрены недостатки эвольвентного зацепления.

Для автоматизации подготовки производства прямозубых конических колёс применяются различные автоматизированные системы, которые позволяют определить точную форму боковой поверхности зубьев. Показано, что на этапе технологической подготовки производства зубчатых колёс для минимизации влияния погрешностей необходимо использовать локализацию контакта, а величину модификации активной боковой поверхности зуба определять с помощью АСТПП во время технологического синтеза передачи. Установлена важность определения характеристик зацепления под нагрузкой для оценки работоспособности передачи. Показано, что для изготовления прямозубых конических передач методом штамповки требуется математическая модель распределения припуска под финишную обработку. Определены этапы технологической подготовки производства прямозубых конических передач (см. рисунок 1) методом штамповки.

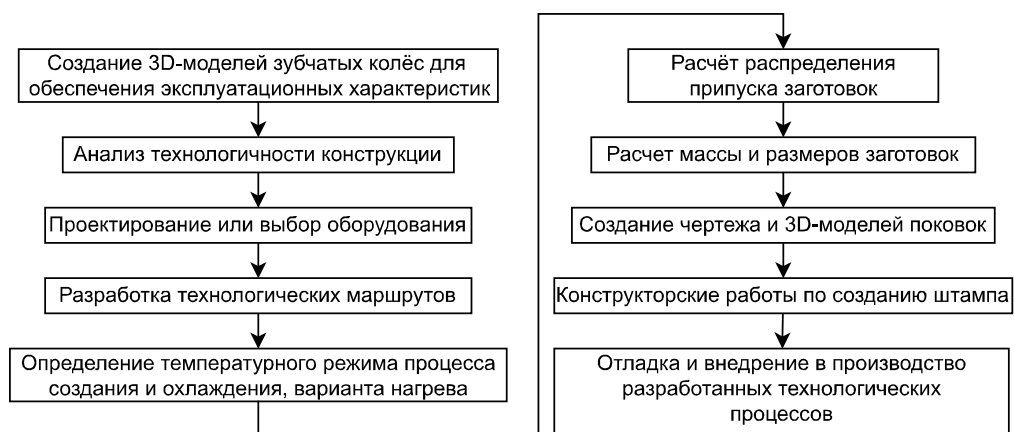


Рисунок 1 – Этапы технологической подготовки производства прямозубых конических передач методом штамповки

Проведён анализ автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки производства конических передач, таких как Kimos, KISSsoft, CAGE, ПК «Волга-6», ПК «Москва» и ПК Эксперт. В ходе анализа систем был выявлен ряд проблем. Для прямозубых конических передач остаётся



нерешённой в строгом виде задача получения такой поверхности зубьев, которая бы обеспечивала пятно контакта, локализованное в заданной зоне поверхности зуба с требуемыми положением и размерами. Возможности синтеза и анализа прямозубых конических передач присутствуют в автоматизированных системах Kimos, KISSsoft и CAGE, однако доступность этих систем в России ограничена. Принципы, по которым эти системы построены, не разглашаются и являются ноу-хау. Возможности оптимизации зацепления в системах Kimos, KISSsoft и CAGE ограничены высокой трудоёмкостью при анализе зацепления. Системы ПК «Волга-б» и ПК Москва разработаны под конкретные технологические процессы на специальном оборудовании для изготовления конкретной технологией резанием. В рассмотренных системах отсутствуют возможности управления распределением припуска на заготовке зубчатых колёс под калибровку.

Для выбора метода оценки работоспособности передачи под нагрузкой было проведено исследование существующих методов решения контактных задач. Для расчета характеристик контакта при заданной нагрузке выбран вариант решения Герца контактной задачи теории упругости, предложенный Ю.Н. Работновым и уточнённый В.И. Медведевым. Этот метод позволяет учесть продольную и профильную локализацию контакта при расчёте контактных напряжений и получить достаточно точное значение контактного давления. Решение Герца не требует больших временных затрат для получения качественного решения, поэтому может быть использовано в задачах оптимизации контактного давления в передаче.

В методе рассматривается несколько фаз на интервале зацепления одной пары зубьев. На каждой фазе  $\theta_{1i}$  зацепления ( $i$  – порядковый номер фазы) с помощью решения Герца определяется мгновенная контактная площадка и рассчитывается максимальное контактное давление  $\sigma_i$ . Максимальное контактное давление  $\sigma_{Hmax}$  при работе зубчатой пары находится как наибольшее из максимальных контактных давлений на всех фазах зацепления:

$$\sigma_{Hmax} = \max_{\theta_1} \sigma_H(\theta_1). \quad (1)$$

Опыт применения решения Герца задачи о контакте зубьев в конической зубчатой передаче показывает, что максимальное контактное давление имеет место на границе однопарного и двухпарного контакта. Для этого определены границы однопарного контакта и получено распределение передаваемого момента в зоне двухпарного контакта. Результатами решения контактной задачи являются суммарное пятно контакта и максимальное контактное давление при работе зубчатой пары. Общая последовательность расчёта характеристик контакта зубчатой передачи с помощью решения Герца представлена на рисунке 2.

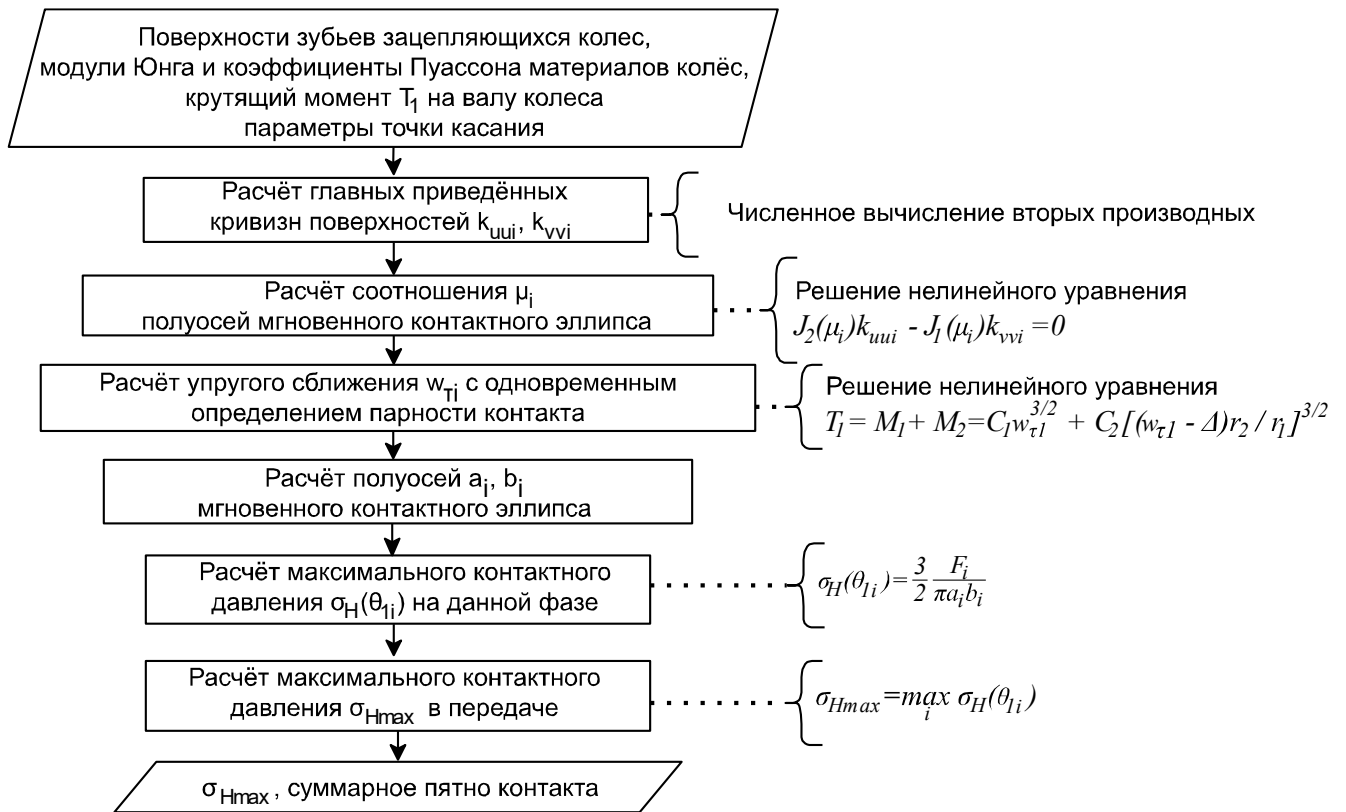


Рисунок 2 – Последовательность расчёта характеристик контакта

Проведённый анализ позволил определить задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, и последовательность их решения.

**Во второй главе** представлен метод технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства.

Приведено описание математической модели модифицированного зубчатого зацепления с локализованным контактом, предложены параметры модификации для изменения геометрической модели зубчатых колёс, описана математическая модель распределения припуска под финишную операцию штамповки.

Для устранения кромочного контакта в прямозубой конической передаче предложена модель модифицированного зацепления. Модифицированные боковые поверхности построены на основе конических эвольвентных поверхностей (см. рисунок 3).

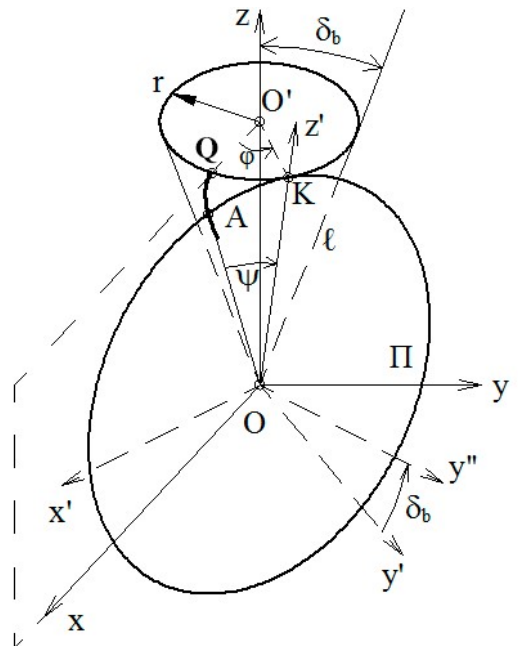


Рисунок 3 – Системы координат для вывода уравнений конической эвольвентной поверхности

Для описания поверхностей выбрана правая система координат  $Oxyz$ , связанная с колесом следующим образом (см. рисунок 3). Начало  $O$  находится в вершине делительного конуса, ось  $z$  – ось делительного конуса. Ось  $X$  выбрана так, чтобы точки  $Q$  возврата сферических эвольвент  $QA$  были расположены в плоскости  $Oxz$ . Уравнение эвольвентной конической поверхности имеет вид ( $i = 1$  для ведомого колеса,  $i = 2$  для ведущего)

$$\begin{aligned}x_i &= L(\sin \phi_i \sin \psi_i + \cos \phi_i \cos \psi_i \sin \delta_{bi}), \\y_i &= L(-\cos \phi_i \sin \psi_i + \sin \phi_i \cos \psi_i \sin \delta_{bi}), \\z_i &= L \cos \psi_i \cos \delta_{bi}.\end{aligned}\quad (2)$$

В качестве поверхностных координат выбраны конусное расстояние  $L$  и параметр  $\phi_i$  сферической эвольвенты  $i$ -го колеса на сфере радиусом  $L$ . В (2) между параметрами имеет место следующее соотношение:

$$\psi_i = \phi_i \sin \delta_{bi}, \quad (3)$$

где  $\delta_{bi}$  – угол основного конуса, связанный с углом  $\alpha$  профиля и углом  $\delta_i$  делительного конуса соотношением

$$\sin \delta_{bi} = \cos \alpha \cdot \sin \delta_i. \quad (4)$$

Чтобы зубчатое зацепление спроектировать как приближённое с точечным контактом, проведена модификация поверхности ведомого колеса в продольном и профильном направлениях. Введены следующие параметры модификации (см. рисунок 4):

- параметр  $L_c$  задаёт радиус сферы с центром в вершине делительного конуса, на которой расположен центр пятна контакта;
- параметр  $d$  равен расстоянию от центра пятна контакта до образующей делительного конуса;
- параметр  $a_0$  определяет полуширину зоны касания;
- параметр  $C$  является коэффициентом профильной модификации.

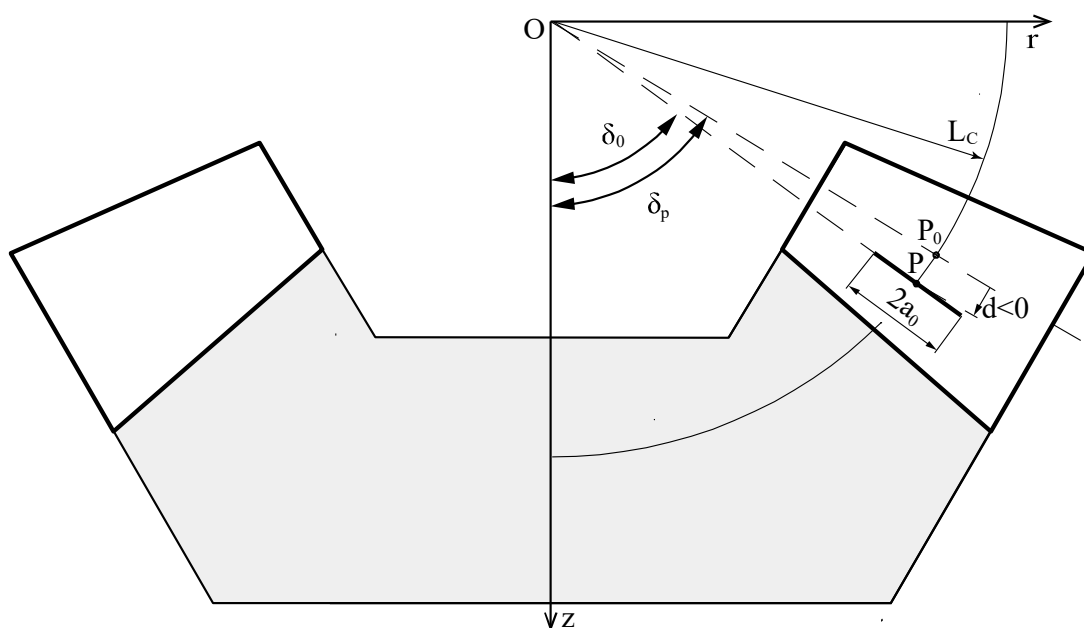


Рисунок 4 – Параметры модификации

На рисунке 4 показано сечение колеса плоскостью, которая проходит через ось OZ вращения колеса и является плоскостью симметрии зуба. В этом сечении контур зуба является четырёхугольником. Точка Р является точкой с нулевой модификацией и находится на конусе с углом  $\delta_0$ . Средняя точка зуба  $P_0$  лежит на пересечении делительного конуса с углом  $\delta_p$  и сферы радиусом  $L_c$ .

Профильная модификация активной боковой поверхности зуба определялась смещением всех точек поверхности ведомого колеса на угол

$$\delta\theta_1 = -C(\phi_1 - \phi_0)^2, \quad (5)$$

где  $\phi_1$  – поверхностная координата точки;

$\phi_0$  – поверхностная координата в точке нулевой модификации.

Продольная модификация производилась с помощью смещения всех точек поверхности ведомого колеса на угол

$$\delta\theta_L = -\frac{\xi(L-L_c)^2}{(r_1 a_0^2)}, \quad (6)$$

где  $\xi$  – толщина слоя краски;

$r_1$  – расстояние от текущей точки до оси вращения ведомого колеса;

$L$  – расстояние от текущей точки до вершины делительного конуса.

Смещение для обоих типов модификации осуществлялось по дуге окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной оси вращения, с центром на этой оси.

Таким образом, модифицированная поверхность зуба ведомого колеса определена уравнениями

$$\begin{aligned} x_{1m} &= x_1 \cos \delta\theta_{1m} - y_1 \sin \delta\theta_{1m}, \\ y_{1m} &= x_1 \sin \delta\theta_{1m} + y_1 \cos \delta\theta_{1m}, \\ z_{1m} &= z_1. \end{aligned} \quad (7)$$

В равенствах (7) при наличии обоих типов модификации

$$\delta\theta_{1m} = \delta\theta_1 + \delta\theta_L. \quad (8)$$

Поверхность зуба ведущего колеса не модифицируется, поэтому

$$x_{2m} = x_2; y_{2m} = y_2; z_{2m} = z_2. \quad (9)$$

Расчёт характеристик зацепления передачи без нагрузки, приведенных на рисунках 5–6, проводился следующим образом.

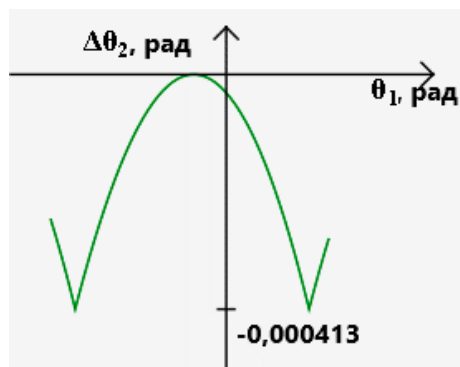


Рисунок 5 – Кривая Бакстера

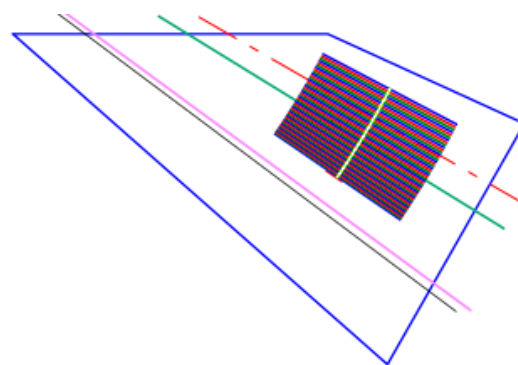


Рисунок 6 – Суммарное пятно контакта без нагрузки

С колесом жёстко связана подвижная система координат  $Ox_1y_1z_1$ , а с шестерней – подвижная система координат  $Ox_2y_2z_2$ , причём начало  $O$  находится в вершине делительного конуса, а координатные оси  $z$  являются осями вращения колёс (рисунок 7).

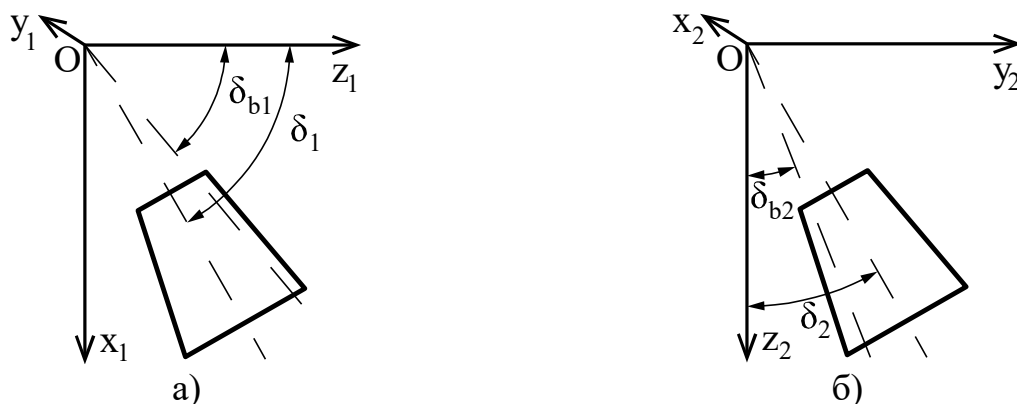


Рисунок 7 – Неподвижные системы отсчета, связанные с а) колесом, б) шестерней

Движение колес при зацеплении рассматривалось в неподвижной системе координат  $Ox_Ly_Lz_L$  сборки, совпадающей с подвижной системой координат шестерни в исходном положении.

Кривая неравномерности передачи вращения (кривая Бакстера) (см. рисунок 5) является графиком зависимости угла  $\Delta\theta_2$  от угла  $\theta_1$  поворота ведомого колеса

$$\Delta\theta_2 = -\theta_2 - \theta_1 N_1/N_2, \quad (10)$$

где  $N_1, N_2$  – числа зубьев ведомого и ведущего колеса соответственно;

угол  $\theta_2$  равен углу поворота ведущего колеса до касания боковых поверхностей. Величина  $\theta_1 N_1/N_2$  равна углу поворота ведущего колеса при кинематически точном зацеплении. Величина  $\Delta\theta_2$  является ошибкой передачи вращения.

Для получения кривой неравномерности вращения и мгновенной зоны касания зубьев требовалось найти точку касания зубьев. Рассматривалось по одному зубу колеса и шестерни в исходном положении, определённом соотношениями (7, 9). Для касания зубьев сначала зубья повернули вокруг оси вращения на углы  $\lambda_i$ , чтобы так, чтобы в плоскости  $Ox_Ly_L$  совместились средние точки немодифицированных поверхностей зубьев  $P_0$  (см. рисунок 4). От этого положения отсчитывались углы поворота  $\theta_i$  шестерни и колеса. Таким образом, чтобы поверхности зубьев коснулись, их необходимо повернуть вокруг осей вращения из исходного положения на углы

$$\theta_1^* = \lambda_1 + \theta_1 + \delta\theta_{1m}; \theta_2^* = \lambda_2 + \theta_2. \quad (11)$$

где  $\lambda_{1,2}$  – углы поворота колёс с немодифицированными боковыми поверхностями зубьев до их касания в средней точке зуба;

$\theta_{1,2}$  – углы поворота колёс в зависимости от фазы зацепления;

$\delta\theta_{1m}$  – дополнительный поворот колеса для учёта модификации поверхности колеса.

Поверхности зубьев после поворота описывались равенствами

$$x_i^* = x_i \cos \theta_i^* - y_i \sin \theta_i^*; y_i^* = x_i \sin \theta_i^* + y_i \cos \theta_i^*; z_i^* = z_i. \quad (12)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты точек, которые определяются соотношениями (7, 9).

Для определения параметров точки касания и характеристик зацепления использована система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_2^*}{\partial \phi_2} \frac{\partial y_1^*}{\partial \phi_1} - \frac{\partial z_1^*}{\partial \phi_1} \frac{\partial x_2^*}{\partial \phi_2} &= 0, \\ y_1^* - x_2^* &= 0, \\ z_1^* - y_2^* &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Первое неравенство выражает условие касания поверхностей. Второе и третье выражают равенство двух координат в точке касания. Равенство третьей координаты обеспечивается тем, что точки касания лежат на одной и той же сфере.

Из системы уравнений (13) на каждой фазе  $\theta_1$  зацепления определяются следующие характеристики: координаты точек касания боковых поверхностей зубьев, ошибка передачи вращения, внутренняя и внешняя границы мгновенных оттисков контакта. Объединение всех мгновенных оттисков контакта представляет собой суммарное пятно контакта без нагрузки (см. рисунок 6).

В работе расчёт необходимого припуска проведен для изготовления прямозубых конических колес методами штамповки. Штамповка зубчатых колёс проводится в несколько этапов. Финишным этапом прецизионной штамповки является холодная калибровка в замкнутом штампе. В работе предложена математическая модель, описывающая форму трёхмерных моделей заготовок под калибровку с учетом требуемого припуска.

На рисунке 8,а изображено сечение зуба заготовки (с припуском перед калибровкой), на рисунке 8,б – сечение готового зуба, а на рисунке 8,в – их объединение. В областях пересечения контуров на рисунке 8,в обозначены три участка с площадями  $S_1, S_2, S_3$ . Принято, что значение площади  $S_i$  берётся со знаком «+», если участок расположен за границей готового зуба, и со знаком «-», если расположен внутри границы готового зуба. Так, на рисунке 8,в  $S_1 < 0, S_2 > 0, S_3 < 0$ .

Разница между площадью сечения зуба под калибровку  $S_{\text{калиб.}}$  и площадью сечения готового зуба  $S_{\text{готов.}}$  равна

$$S_{\text{калиб.}} - S_{\text{готов.}} = S_1 + S_2 + S_3. \quad (14)$$

При определении припуска необходимо следить, чтобы величина  $S_1 + S_2 + S_3$  была положительной. Если она будет отрицательной, то металла, оставленного перед калибровкой, не хватит для заполнения остальных участков.

Припуск задается в трёх точках (рис. 8,в) отдельно для каждого из колес пары шестью параметрами распределения припуска в среднем сечении зуба. Положение каждой из точек определяется смещением  $h_i$  ( $i=1...3$ ) относительно кромки при вершине зуба заготовки в направлении, перпендикулярном этой кромке, и припуском  $dh_i$  в  $i$ -й точке, величина которого равна половине увеличения окружной толщины зуба. Значение  $dh_i$  положительно, если точка находится вне сечения готового зуба, и отрицательно, если точка расположена внутри сечения.

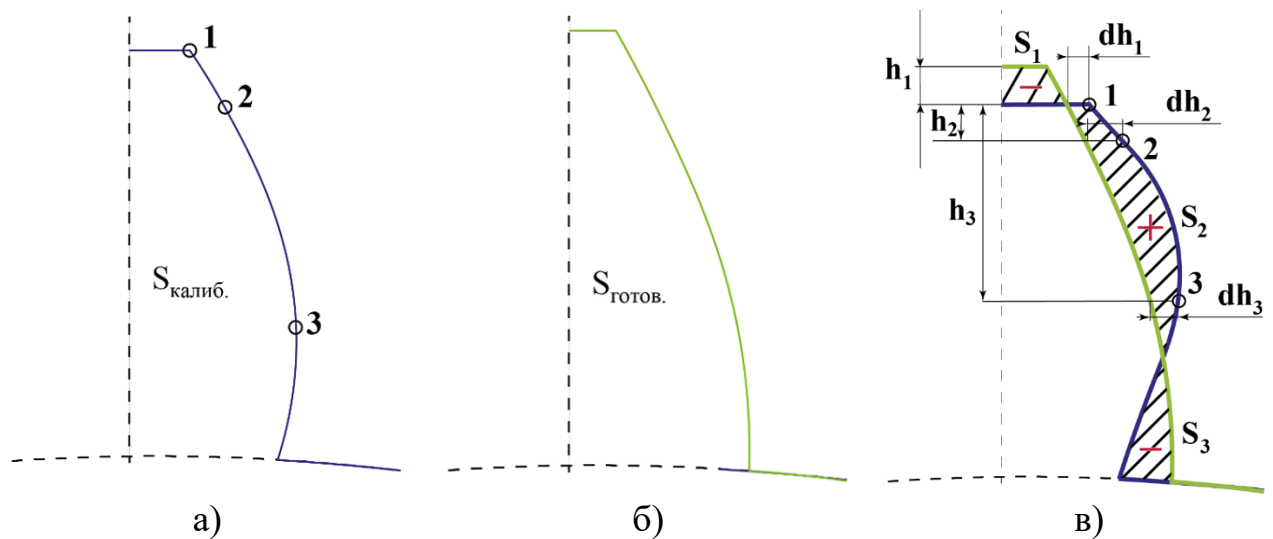


Рисунок 8 – Схема расчёта припуска

Для каждой точки поверхности зуба в сечении сферой радиусом  $L$  толщина припуска  $\Delta h$  определена функцией

$$\Delta h = \Delta h(\delta), \quad (15)$$

где  $\delta$  – полярный угол точки на пересечении сферы радиусом  $L$  с поверхностью зуба.

Функция  $\Delta h$  представлена в виде

$$\Delta h(\delta) = A_0(L) + A_1(L)\delta + A_2(L)\delta^2, \quad \delta \geq \delta_e \quad (16)$$

$$\Delta h(\delta) = A_0(L) + A_1(L)\delta_e + A_2(L)(\delta_e)^2 + [A_1(L) + 2A_2(L)](\delta - \delta_e), \quad \delta \leq \delta_e, \quad (17)$$

где  $\delta_e$  – угол наклона границы эвольвентной части зуба к оси колеса.

Соотношения для коэффициентов  $A_0, A_1, A_2$  приведены в диссертации.

Предложенная математическая модель позволяет технологу формировать трехмерные модели заготовок с учетом необходимого припуска под калибровку.

**В третьей главе** разработаны методики, применяемые при взаимодействии с программным средством в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства.

Для каждого набора значений параметров пятно контакта будет локализовано по-своему и значения контактного давления будут отличаться. Вариант выбора набора значений параметров модификации описан в диссертации в виде методики подбора параметров модификации для локализации контакта.

Чтобы выбрать один набор значений параметров модификации, в работе предлагается определять такие значения параметров, при которых контактное давление в передаче будет минимальным, а пятно контакта будет локализовано. Для этого поставлена и решена задача условной оптимизации контактного давления: найти минимум целевой функции

$$f(L_c, a_0, d, C) = \sigma_{Hmax}$$

с ограничениями вида

$$g_j(L_c, a_0, d, C) > 0, \quad j = 1 \dots s, \quad (18)$$

где  $s$  – число ограничений.

Значение функции  $g_j$  по модулю равно расстоянию от пятна контакта до границы зуба и отрицательно в случае, если пятно выступает на границу зуба.

Для решения этой задачи предложен эвристический алгоритм условной оптимизации максимального контактного давления в передаче, учитывающий назначение параметров модификации и обеспечивающий получение решения, близкого к оптимальному. Общая структура алгоритма представлена на рисунке 9.

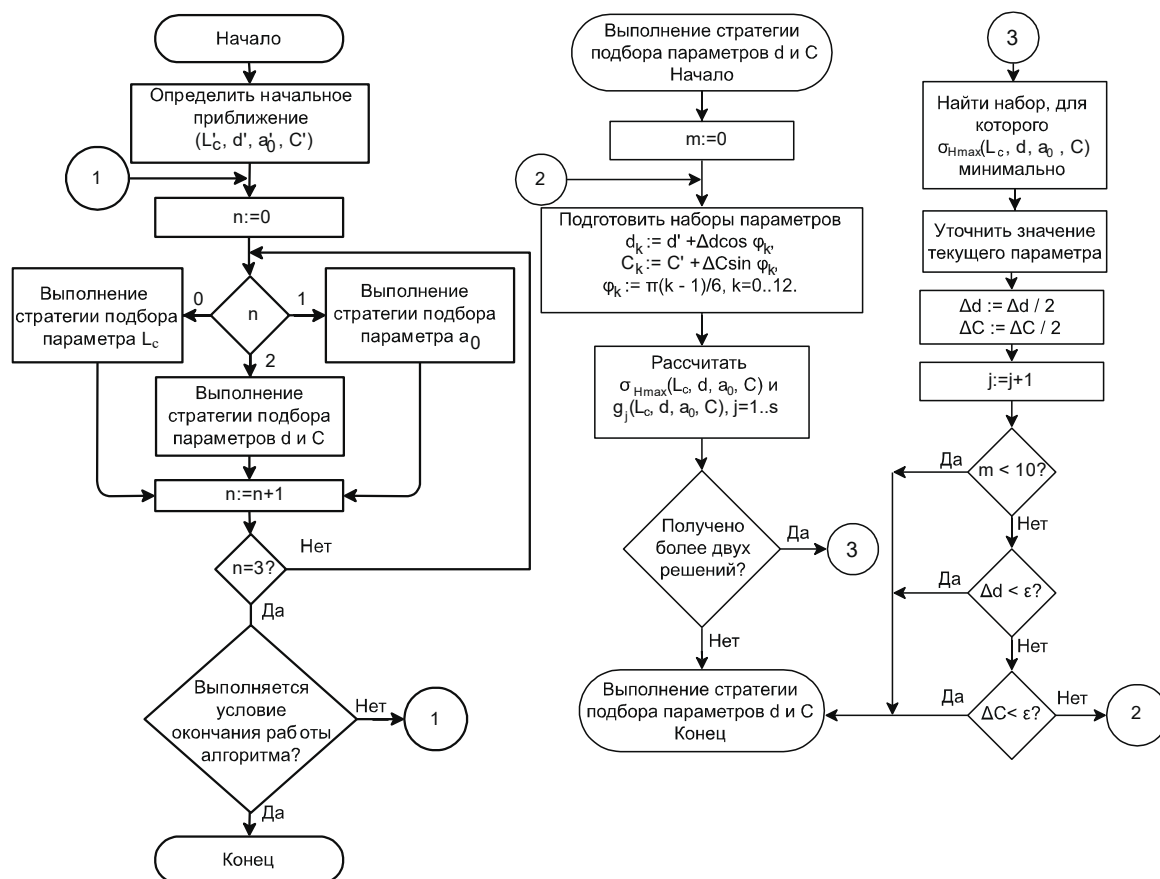


Рисунок 9 – Блок-схема эвристического алгоритма решения задачи условной минимизации максимального контактного давления в передаче

В качестве начального приближения выбирается точка  $(L'_c, a'_0, d', C')$ , для которой выполняются ограничения (18). Один из вариантов выбора значений параметров модификации в качестве начального приближения описан в работе в методике подбора параметров модификации для локализации контакта.

В алгоритме используются три стратегии подбора: подбор параметра  $L_c$ , подбор параметра  $a_0$  и подбор параметров  $d$  и  $C$ . На каждой стратегии подбор проходит в несколько итераций.

В работе эвристического алгоритма значения параметров модификации подбирались таким образом, чтобы пятно контакта распространилось по зубу с учётом требуемых ограничений на размеры пятна, что приведёт к снижению максимального контактного давления.

Целью стратегии подбора параметра  $L_c$  является обеспечение одинакового расстояния от пятна контакта до внутреннего и до внешнего торцов.



Целью стратегии подбора параметра  $a_0$  является увеличение ширины пятна контакта в соответствии с заданным значением  $b_{отн.}$ , равным отношению требуемой ширины пятна контакта к ширине зубчатого венца.

Подбор параметров  $d$  и  $C$  проводят совместно (см. рисунок 9), а целью стратегии является минимизация контактного давления. На каждой итерации стратегии рассматривается 12 кандидатов на продолжение поиска решения, отсчитываемых от текущего приближения с некоторым шагом. Из них в качестве решения итерации выбирается точка, которая удовлетворяет ограничениям (18) и в которой значение целевой функции минимально. Если ни один из 12 кандидатов не удовлетворяет требуемым условиям, то шаг уменьшается вдвое. Выполнение стратегии прекращается, если шаг становится меньше наперёд заданного значения.

Таким образом, эвристический алгоритм условной оптимизации контактного давления позволяет получить значения параметров модификации, обеспечивающие минимальное значение максимального контактного давления в передаче и локализованное пятно контакта заданных размеров (см. рисунок 10).



Рисунок 10 – Характеристики контакта а) зависимость максимального контактного давления от фазы зацепления б) пятно контакта

Для моделирования распределения припуска разработана методика управления припуском путем подбора значений параметров распределения припуска, которая выполняется итерационно. Сперва устанавливаются начальные значения параметров распределения припуска. Затем на каждой итерации рассчитываются значения участков площадей между пересечениями сечений готового зуба и зуба с припуском. Затем производится коррекция параметров распределения припуска за счёт параметров  $dh_2$  и  $dh_3$  (см. рисунок 11) и выполняется проверка корректности распределения припуска

$$S_1 + S_2 + S_3 > k * S_{готов.з} \quad (19)$$

где  $k$  – коэффициент, который устанавливает минимально допустимое отношение площади сечения припуска ( $S_1 + S_2 + S_3$ ) к площади готового зуба ( $S_{готов.з}$ ).

Разработана методика технологического синтеза передачи (см. рисунок 12). Цель методики состоит в получении трёхмерных моделей зубчатых колёс по их чертежам для подготовки производства прямозубой конической передачи. В результате выполнения методики технолог получает оптимизированные трёхмерные модели зубчатых колёс с учетом локализации контакта и трехмерные модели заготовок зубчатых колёс с учетом припуска под холодную калибровку.

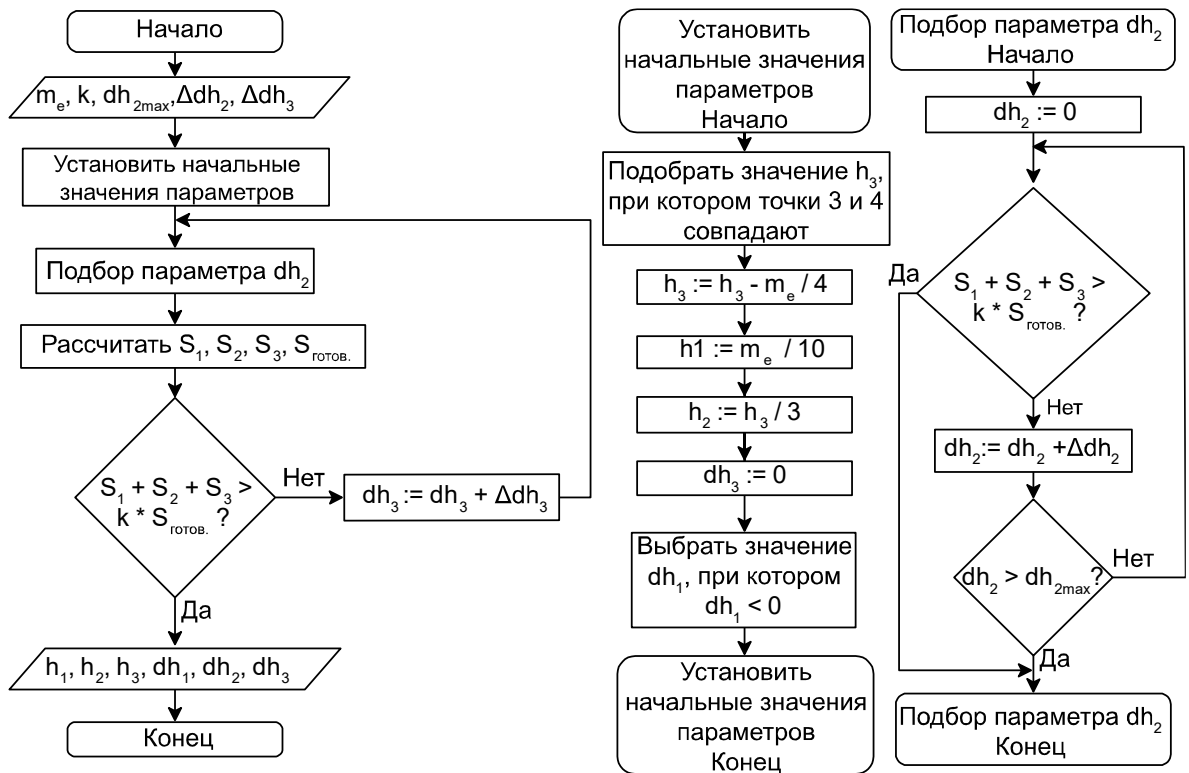


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма в рамках методики управления припуском

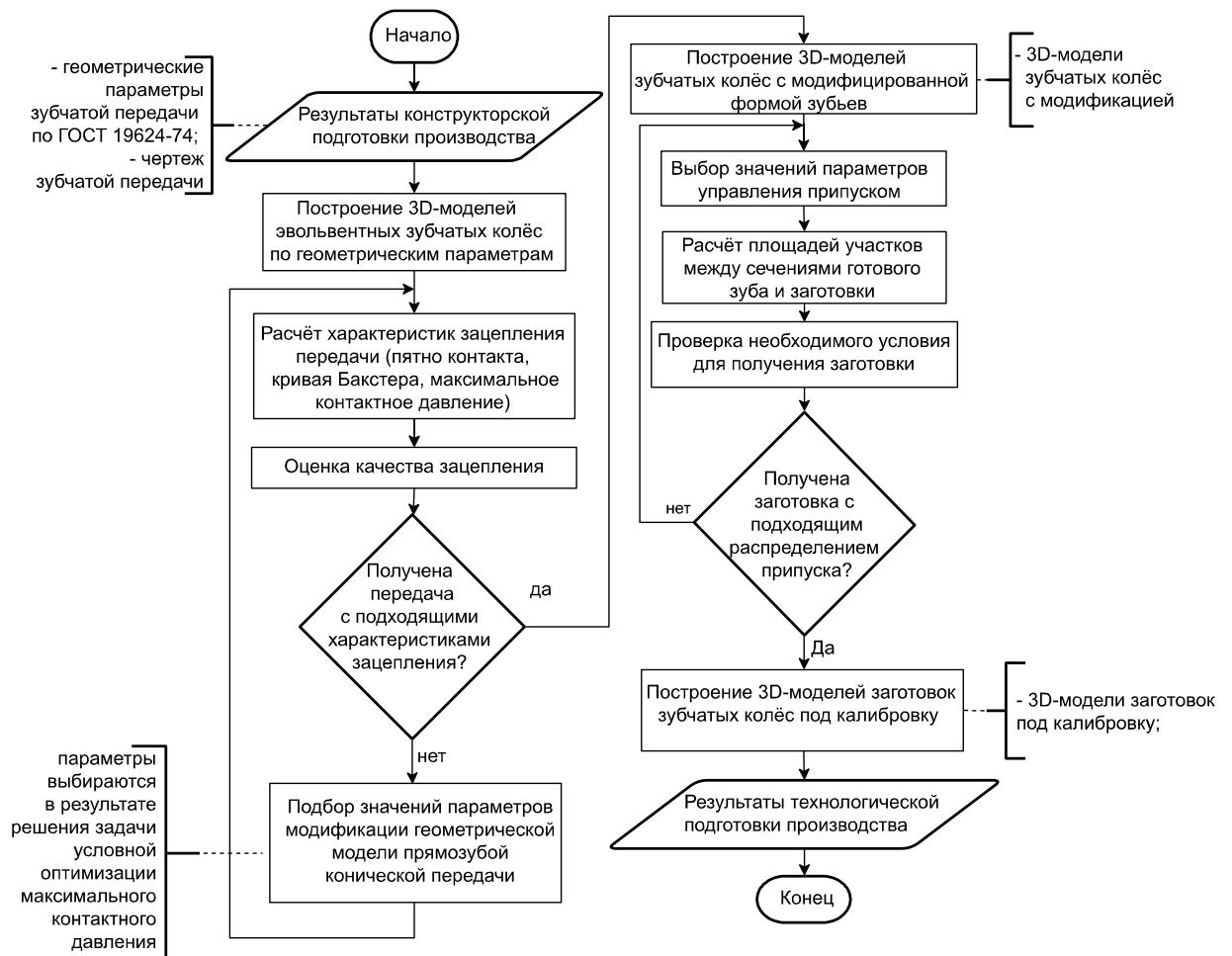


Рисунок 12 – Структура процесса технологического синтеза передачи

В четвёртой главе приведены особенности реализации программного средства поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства, приведены особенности его экспериментальной проверки.

Было разработано программное средство поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства. Разработанное программное средство автоматизирует этапы процесса технологической подготовки производства прямозубых конических передач и реализует предложенный метод их технологического синтеза. Структура программного средства представлена на рисунке 13.



Рисунок 13 – Структура программного средства в составе АСТПП

Разработка программного средства осуществлялась на языке Java с помощью интегрированной среды разработки IntelliJ IDEA. Каждый из классов в приложении можно отнести к одному из трёх уровней – уровню хранения данных, модели или пользовательского интерфейса. На рисунке 14 представлена диаграмма классов, описывающих эвристический алгоритм условной оптимизации.

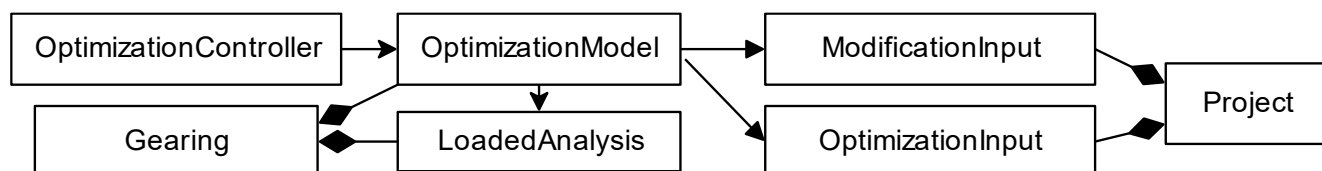


Рисунок 14 – Диаграмма классов эвристического алгоритма условной оптимизации

Разработанное программное средство позволяет на этапе технологической подготовки производства:

- рассчитывать характеристики зацепления и контакта прямозубой конической передачи (пятно контакта, кривая неравномерности передачи вращения, максимальное контактное давление);

- подбирать параметры модификации трёхмерной модели эвольвентного зубчатого зацепления для получения требуемого локализованного контакта и минимизации контактного давления;
- проводить расчёт трёхмерных моделей зубчатых колёс;
- подбирать припуск на заготовке под калибровку;
- рассчитывать трёхмерную модель заготовки под калибровку.

На рисунке 15 представлен пример функционирования разработанного программного средства поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач.

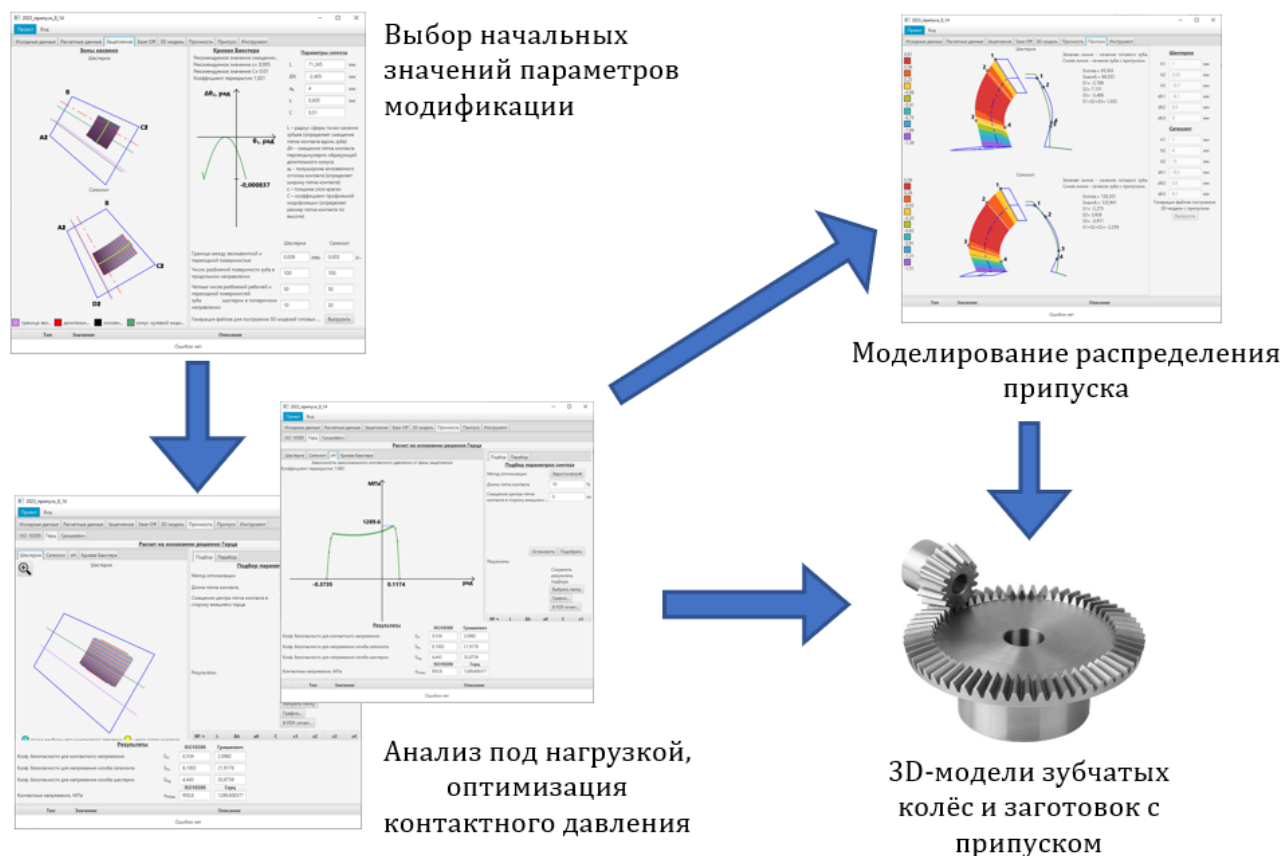


Рисунок 15 – Пример функционирования программного средства

Для экспериментальной проверки и апробации работы проведены испытания зубчатых колёс. С помощью разработанного программного средства проведён технологический синтез передачи с числами зубьев 9-16 с локализованным пятном контакта. Проводился подбор параметров распределения припуска и подготовка трёхмерных моделей зубчатых колёс и заготовок. По этим моделям на ПАО «КАМАЗ» была изготовлена зубчатая пара методами прецизионной штамповки и были проведены её испытания. В результате этого было подтверждено соответствие теоретических результатов практическим, получен акт об успешном испытании шестерен. Получен акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы при подготовке производства прямозубых конических передач заднего моста автомобиля и заключение о вводе программного обеспечения в эксплуатацию.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи повышения эффективности технологической подготовки производства прямозубых конических передач за счёт разработки метода и средств поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства.
2. На основе проведённого обзора литературы, анализа автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки производства прямозубых конических передач были установлены связи между эксплуатационными требованиями к характеристикам зацепления прямозубой конической передачи и структурой технологической подготовки производства прямозубых конических передач.
3. На основе установленных взаимосвязей разработан метод технологического синтеза прямозубых конических передач в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства. Для него была разработана математическая модель модифицированной прямозубой конической передачи и математическая модель построения трёхмерной модели заготовки с припуском для финишной операции штамповки. Отличительной особенностью метода технологического синтеза является возможность расчёта трёхмерных моделей зубчатых колёс с требуемой локализацией контакта, расчёта характеристик зацепления передачи под нагрузкой, расчёта трёхмерных моделей заготовок зубчатых колёс с требуемым распределением припуска. Для управления степенью локализации введены параметры модификации трёхмерной модели. Для управления припуском введены параметры распределения припуска.
4. Разработан эвристический алгоритм условной оптимизации максимального контактного давления за счёт подбора значений параметров модификации при условии недопущения кромочного контакта. Алгоритм отличается возможностью получения удовлетворительного результата за приемлемое время.
5. Разработана методика подбора значений параметров модификации для получения локализованного контакта. Полученные с её помощью значения параметров модификации могут быть использованы в качестве начальных приближений для последующей условной оптимизации контактных давлений. Разработана методика подбора значений параметров распределения припуска, при которых обеспечивается достаточное количество металла в заготовке для заполнения формы готового зуба. Предложена методика технологического синтеза прямозубых конических передач, которая позволяет получить трёхмерные модели зубчатых колёс для прямозубой конической передачи с требуемым локализованным контактом и трёхмерные модели заготовок с припуском, изготавливаемых методами штамповки.

6. Разработано программное средство поддержки технологического синтеза прямозубых конических передач в составе АСТПП. Оно включает программные модули расчёта модифицированной 3D-модели зубчатых колёс, расчёта характеристик зацепления и контакта, оптимизации максимального контактного давления в передаче и расчёта 3D-модели заготовок с припуском под финишную операцию штамповки. Разработанное программное средство позволяет повысить эффективность технологической подготовки производства за счёт сокращения сроков и трудоёмкости технологической подготовки производства и повышения качества изготавливаемых шестерен.
7. Работа программного средства была протестирована на более чем 20 передачах, результаты по четырём из них приведены в работе. Одна из этих передач изготовлена на ПАО «КАМАЗ», где разработанное программное средство прошло экспериментальную проверку. Испытание зубчатых колёс, изготовленных по 3D-моделям, рассчитанным для данной зубчатой передачи с помощью программного средства, дало положительные результаты, что подтверждено соответствующими актами. По результатам испытаний программное средство было внедрено на ПАО «КАМАЗ».
8. Проведенная на ПАО «КАМАЗ» экспериментальная проверка результатов диссертационной работы подтвердила соответствие теоретических результатов практическим и возможность использования разработанных математических моделей, методик и программных средств для подготовки производства прямозубых конических передач методами штамповки в различных отраслях промышленности. Внедрение результатов диссертационной работы может обеспечить значительный экономический эффект.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК РФ:*

1. Медведев В.И. Алгоритмы синтеза и анализа зацепления эвольвентных прямозубых конических колес с локализованным контактом / Медведев В.И., Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Вестник МГТУ "Станкин", 2019, № 1 (48). – С. 98-105.
2. Волков А.Э. Программный комплекс для расчета прямозубых конических передач с локализованным контактом / Волков А.Э., Лагутин С.А., **Бирюков С.С.** // Интеллектуальные системы в производстве, 2020, Том 18, № 3. – С. 77-84.
3. Волков А.Э. Распределение контактных давлений в модифицированной эвольвентной конической зубчатой передаче / Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Вестник МГТУ "Станкин", 2021, № 3 (58). – С. 13-17.

### *Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в Scopus:*

4. V. Medvedev Automation of Technological Preproduction of Straight Bevel Gears / V. Medvedev, A. Volkov and **S. Biryukov** // Mechanisms and Machine Science. – Springer, 2020. – vol. 81. – pp. 133-155.

5. A. E. Volkov Minimization of Contact Pressure in the Straight Bevel Gear with Saving of Its Size / A. E. Volkov, **S. S. Biryukov**, and S. A. Lagutin // Mechanisms and Machine Science. – Springer, 2021. – vol. 101. – pp. 325-338.

*Статьи в сборниках научных трудов всероссийских и международных конференций:*

6. Волков А.Э. Методика подбора параметров синтеза для локализации контакта в прямозубой конической передаче / Волков А.Э., Медведев В.И., **Бирюков С.С.** // Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2019. – С. 261-266.
7. Волков А.Э. Постановка задачи условной оптимизации при исследовании контакта в прямозубой конической передаче / Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Наука сегодня: вызовы, перспективы и возможности [Текст]: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 11 декабря 2019 г.: в 2 частях. Часть 1. – Вологда: ООО «Маркер», 2019. – 128 с.
8. Бирюков С.С. Задача условной оптимизации контактных давлений в прямозубой конической передаче / **Бирюков С.С.**, Волков А.Э. // Материалы XIII всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2020)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 444 с.
9. Волков А.Э. Алгоритм условной оптимизации контактных давлений в прямозубой конической передаче с локализованным контактом / Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – №9. – 96 с.
10. Волков А.Э. Построение трёхмерной модели прямозубого конического колеса с припуском под калибровку / Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Материалы XV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2022)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. – 337 с.
11. Волков А.Э. Технологическая подготовка производства прямозубых конических передач для изготовления методом штамповки / Волков А.Э., **Бирюков С.С.** // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы X международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2022. – № 13. – 174 с.