

На правах рукописи



ГАВАРИЕВА КСЕНИЯ НИКОЛАЕВНА

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ  
ПРЕЦИЗИОННОЙ ШТАМПОВКИ ЗУБЧАТЫХ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС НА  
ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (в машиностроении)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2021

Работа выполнена на кафедре автоматизации и управления Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель:

**Симонова Лариса Анатольевна**

доктор технических наук, профессор, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО К(П)ФУ, г. Наб. Челны, заведующий кафедрой автоматизации и управления

Официальные оппоненты:

**Катасёв Алексей Сергеевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, профессор кафедры систем информационной безопасности

**Лютков Алексей Германович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», г. Москва, профессор кафедры автоматических систем института кибернетики

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита состоится «14» мая 2021 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета КФУ.05.01 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», УЛК-5, ауд. 309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО К(П)ФУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенные печатью) направлять по адресу: 423812, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Сююмбике, 10А; диссертационный совет КФУ.05.01; e-mail: mirkamp@mail.ru

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
КФУ.05.01



к.т.н., доцент  
Мавлеев Ильдус Рифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В современном машиностроении широкое применение получила горячая объемная штамповка (ГОШ), характерной особенностью которой является получение поковок сложной геометрической формы с улучшенными физико-механическими свойствами и малой себестоимостью. Необходимость обеспечения жестких допусков на размер обуславливает применение прецизионной штамповки, эффективность которой возрастает при применении автоматизированных систем управления технологическим процессом (ТП).

Применяемые системы управления ГОШ частично автоматизированы, однако контроль параметров ТП выполняется с участием оператора. Таким образом имеется насущная потребность создания СУ прецизионной ГОШ с применением элементов искусственного интеллекта для получения поковок зубчатых конических колес с необрабатываемым зубчатым профилем.

Фундаментальная теоретическая база в области ГОШ сформирована в трудах Л.Б. Аксенова, К.Н. Богоявленского, В.А. Евстратова, А.З. Журавлева, Е.Н. Ланского, А.Г. Овчинникова, Я.М. Охрименко, Е.И. Семенова, И.Е. Сосенушкина, М.В. Сторожева, Г.П. Тетерина, В.Г. Шибакова и др.

Применение искусственного интеллекта для проектирования и управления ТП развито в работах Л.С. Болотовой, Л. Заде, А.С. Катасёва, А. Кофман, Ж.-Л. Лорьер, А.Г. Лютова, Е.А. Мамдани, С. Рассел, М. Сугено, В.Б. Тарасова, Л.А. Симоновой и других и основывается на применении современных методов и технологий обработки знаний в сочетании с достижениями теории автоматического управления. Это дает возможность проектировать автоматические системы управления с различной степенью использования искусственного интеллекта, способных выполнять поставленные цели и задачи в условиях неопределенности.

На сегодняшний день недостаточная изученность вопросов создания автоматизированных систем управления технологическим процессом ГОШ делает управление процессом в режиме реального времени труднореализуемым и трудозатратным.

Таким образом, актуальной **научной задачей** является автоматизация технологического процесса прецизионной штамповки на основе создания системы управления (СУ) с элементами искусственного интеллекта для обеспечения эффективности производства и требуемых показателей качества поковок зубчатых конических колес с необрабатываемым зубчатым профилем, таких как точность высотного размера поковки, положение пятна контакта при зацеплении с ответным колесом. Эффективность СУ достигается научной обоснованностью принимаемых решений, качеством и доступностью, требуемой для управления в реальном времени информации и своевременностью управляющих воздействий.

**Объект исследования** – технологический процесс прецизионной штамповки зубчатых конических колес.

**Предмет исследования** – система управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта.

**Цель исследования** – повышение эффективности функционирования системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта, обеспечивающей требуемые показатели качества изделий.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Информационно-аналитический обзор состояния вопроса автоматизации технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колёс, выбор и обоснование методов искусственного интеллекта, позволяющих повысить эффективность функционирования системы управления ТП.

2. Определение зависимостей показателей качества изделия от параметров технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес с целью формирования правил базы знаний интеллектуальной надстройки.

3. Разработка метода управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес с применением нечеткой логики.

4. Разработка модели формализованного описания работы системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес, позволяющей представить структуру, набор правил и связи компонентов.

5. Разработка многоуровневой структурной модели системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе интеллектуальной многоагентной системы, обеспечивающей достижение требуемых показателей качества.

6. Разработка прикладной программы и алгоритма работы системы управления процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес, оценка эффективности разработанной интеллектуальной надстройки.

**Научная новизна:**

1. Разработана модель формализованного описания работы элементов системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес в виде графа функционирования, позволяющая представить структуру, набор правил и связи компонентов.

2. Разработана многоуровневая структурная модель системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта, обеспечивающая достижение требуемых показателей качества.

3. Разработан метод управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентного подхода в сочетании с нечеткой логикой, обеспечивающий требуемые показатели качества изделия при изменяющихся условиях технологического процесса.

**Теоретическая значимость** заключается в разработанном методе и алгоритме управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта.

**Практическая значимость работы.** Разработанный алгоритм интеллектуальной системы управления применен для производства опытных партий штамповки зубчатых конических колес на Кузнечном заводе ПАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны) и рекомендован для внедрения в производство.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применены методы системного анализа, математического моделирования; объектно-ориентированного программирования, моделирования на основе элементов искусственного интеллекта.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модель системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес с применением нечеткой логики, описываемый графом функционирования в виде логико-программного управления, представляющая структуру и набор правил, а также движение и связи системы.

2. Многоуровневая структурная модель системы управления процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес для обеспечения требуемых показателей качества изделий, основанная на применении элементов искусственного интеллекта.

3. Алгоритмы формирования базы знаний и интеллектуального управления системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** исследования обеспечивались применением стандартных методик расчетов и современного математического аппарата.

**Реализация работы.** Полученные результаты диссертационной работы были использованы на примере калибровочной операции для штамповки опытных партий штамповки зубчатых конических колес на Кузнечном заводе ПАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны) и в учебном процессе при реализации программы магистратуры по направлению подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» в Набережночелнинском институте (филиале) КФУ

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международной научно-технической конференции по инновационным инженерным технологиям, оборудованию и материалам ISTC-IETEM (г. Казань, 2016 г.);

- Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017 (МНТК "ИМТОМ-2017" г. Казань);

- Международной конференции «Энергосбережение. Наука и образование» (г. Набережные Челны, 2017 г.);

- Международной Российской Автоматизированной Конференции RusAutoCon-2018 (г. Сочи, 2018 г.);

- 9-й Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018» (МНТК «ИМТОМ – 2018») (г. Казань, 2018 г.).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и 3 статьи в журналах, индексируемых в Scopus.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Основные результаты диссертационной работы соответствуют пункту 1 «Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки», пункту 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)» паспорта научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, содержащего 20 таблиц, 42 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены современные требования к качеству зубчатых конических колес в соответствии с ГОСТ 1758–81, согласно которому зубчатая передача (и зубчатое колесо) соответствующей степени точности характеризуется тремя видами нормы: кинематическая точность, плавность работы и норма контакта зубьев.

Традиционно изготовление зубчатого конического колеса в массовом производстве выполняют механической обработкой на зуборезных и фрезерных станках. Производство резанием обеспечивает нормы точности зубчатых передач, но является достаточно затратным методом. На основе патентно-литературного обзора выявлено, что эффективным способом производства зубчатых конических колес является прецизионная горячая объемная штамповка, позволяющая увеличить прочность и износостойкость зубьев, сократить расход материала на 30-50% и уменьшить износ режущего инструмента.

По общим рекомендациям штамповка прямозубых конических колес выполняется по следующей технологии: осадочная операция нагретой заготовки до температуры  $1100 \div 1150^\circ \text{C}$ , предварительная штамповка, окончательная штамповка (рисунок 1). Штамповка выполняется на кривошипном горячештамповочном прессе. Обрезка заусенца и прошивка отверстия выполняется на обрезающем прессе.

Горячая объемная штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах относится к многофакторным технологическим процессам. В основном проводится без учета нестабильности параметров технологического процесса: температуры и объема заготовки, температуры нагрева оснастки перед деформацией, величины деформирующей силы. Поэтому внедрение системы управления

прецизионной штамповкой зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта, учитывающей колебания основных параметров ТП, позволит обеспечить повышенную точность поковок.

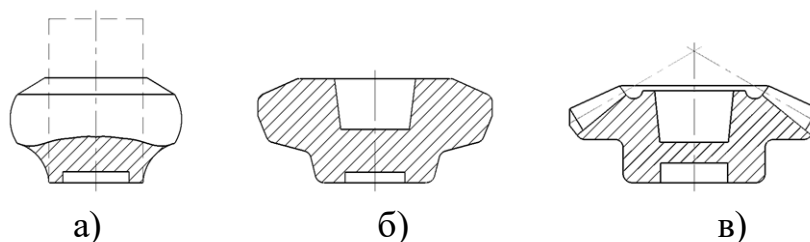


Рисунок 1 – Схема переходов горячей объемной штамповки зубчатого конического колеса:

а) осадочная операция; б) предварительная штамповка;  
в) окончательная штамповка

Проанализировав методы искусственного интеллекта по таким критериям, как автономность, адаптивность, устойчивость к сбоям, масштабируемость и гибкость, наличие цели и реактивность, были определены преимущества многоагентных систем (МАС) для организации интеллектуальной поддержки принятия решений технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых колес. Наибольший эффект может быть достигнут при комбинировании МАС с элементами нечеткой логики для использования разрозненных сведений, оперирования нечеткими и недостоверными знаниями, что позволит получать достаточно эффективное решение для разрабатываемого процесса в условиях недостатка информации.

**Во второй главе** определены зависимости показателей качества изделия от параметров технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес в системе интеллектуального управления (таблица 1). Указанные параметры технологического процесса являются определяющими для получения качественных деталей. Согласно представленным зависимостям, формируются правила базы знаний интеллектуальной надстройки.

Технологический процесс прецизионной штамповки является нелинейным и динамическим, поэтому сложно обеспечить точное управление. Для формирования эффективной системы управления, учитывающей априорную неопределенность данных, применяется управление на основе нечеткой логики.

Принадлежность каждого параметра технологического процесса к лингвистическим термам «низкая», «оптимальная», «высокая» определяется посредством соответствующих функций принадлежности. Для прецизионной штамповки зубчатых конических колес выбрана функция принадлежности треугольной формы. Определены ключевые точки, по которым аппроксимируется дискретное представление функции принадлежности.

Переход к нечеткому множеству от заданных четких значений представлен на примере лингвистических переменных «Температура заготовки» и «Температура штампа», для которых определены и сформированы базовые терм-множества.

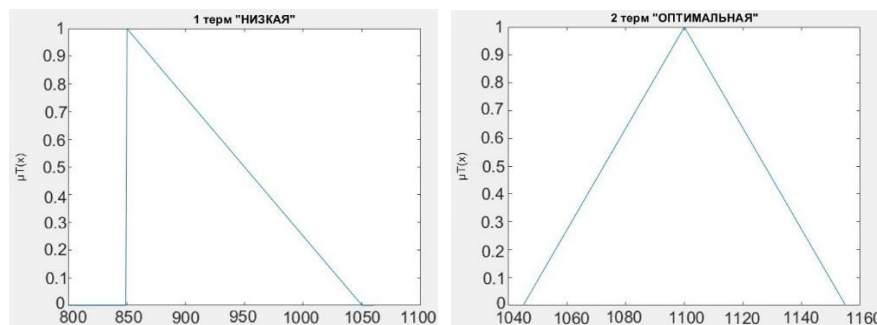
Таблица 1 – Таблица зависимости показателей качества изделия от параметров технологического процесса

| Компонент технологического процесса | Дефект                            | Показатель качества изделия                  | Параметр технологического процесса              | Зависимость                |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| Заготовка                           | Трещины                           | Пластичность ( $\delta$ )                    | Температура индукционного нагрева (Т)           | $\delta = f(T)$            |
|                                     | Увеличенный размер зерен металла  | Прочность ( $\sigma$ )                       |                                                 | $\sigma = f(T)$            |
|                                     | Пережог                           |                                              |                                                 |                            |
| Инструмент                          | Трещины термические               | Эксплуатационная стойкость штампа (N)        | Температура нагрева штамповой оснастки (Т)      | $N = f(T)$                 |
|                                     | Самоотпуск инструментальной стали |                                              |                                                 |                            |
| Поковка                             | Разновысотность размера           | Площадь пятна контакта ( $\Phi_{\text{п}}$ ) | Закрытая высота штампа калибровочного ( $H_3$ ) | $\Phi_{\text{п}} = f(H_3)$ |

Для лингвистической переменной «Температура заготовки» определяются функции принадлежности:

$$\begin{aligned}
 \text{"низкая"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 850 \\ \frac{x-850}{950-850}, & 850 \leq x \leq 952 \\ \frac{1055-x}{1055-952}, & 952 \leq x \leq 1055 \\ 0, & 1055 \leq x \end{cases}, & \text{"оптимальная"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 1045 \\ \frac{x-1045}{1100-1045}, & 1055 \leq x \leq 1100 \\ \frac{1155-x}{1155-1100}, & 1100 \leq x \leq 1155 \\ 0, & 1155 \leq x \end{cases}, \\
 \text{"оптимально-высокая"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 1145 \\ \frac{x-1145}{1175-1145}, & 1145 \leq x \leq 1175 \\ \frac{1205-x}{1205-1175}, & 1175 \leq x \leq 1205 \\ 0, & 1205 \leq x \end{cases}, & \text{"высокая"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 1195 \\ \frac{x-1195}{1233-1195}, & 1195 \leq x \leq 1233 \\ \frac{1270-x}{1270-1233}, & 1233 \leq x \leq 1270 \\ 0, & 1270 \leq x \end{cases}.
 \end{aligned}$$

Графически функции принадлежности лингвистической переменной «Температура заготовки» представлены на рисунке 2.





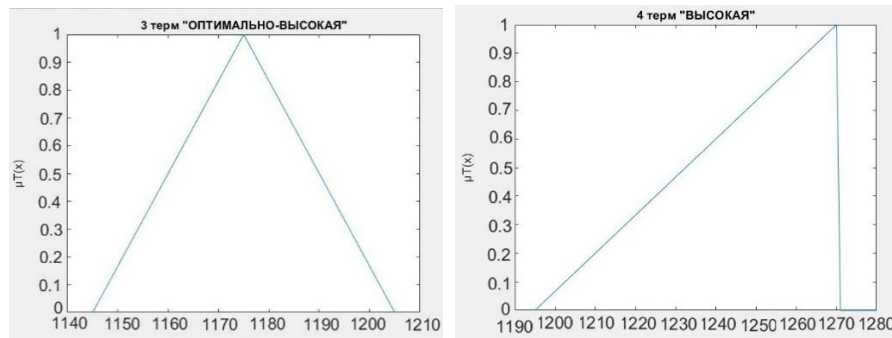


Рисунок 2 – Графическое представление функций принадлежности  
«Температура заготовки»

Аналогично определяем функции принадлежности для лингвистической переменной «Температура штампа»:

$$\begin{aligned}
 \text{"низкая"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 180 \\ \frac{x-180}{193-180}, & 180 \leq x \leq 193 \\ \frac{205-x}{205-193}, & 193 \leq x \leq 205 \\ 0, & 205 \leq x \end{cases}, & \text{"оптимальная"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 195 \\ \frac{x-195}{225-195}, & 195 \leq x \leq 225 \\ \frac{255-x}{255-225}, & 225 \leq x \leq 255 \\ 0, & 255 \leq x \end{cases}, \\
 \text{"высокая"} \mu_A(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 245 \\ \frac{x-245}{273-245}, & 245 \leq x \leq 273 \\ \frac{273-x}{300-273}, & 273 \leq x \leq 300 \\ 0, & 300 \leq x \end{cases}.
 \end{aligned}$$

Графически функции принадлежности лингвистической переменной «Температура штампа» представлены на рисунке 3.

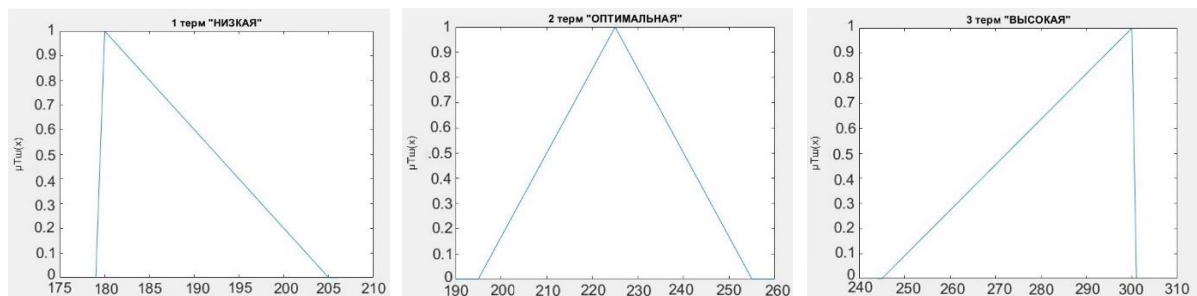


Рисунок 3 – Графическое представление функций принадлежности  
«Температура штампа»

На основе получившихся лингвистических переменных и их нечетких значений в работе сформированы 30 нечетких правил управления типа «ЕСЛИ (условие), ТО (действие)».

Правила на примере лингвистических переменных «Температура заготовки» и «Температура штампа» для изготовления зубчатых конических колес из легированной стали 18ХГР имеют следующий вид:

- ЕСЛИ температура штампа «высокая», ТО требуется увеличить объем подачи охлаждающей жидкости по водяным каналам штампа;

- ЕСЛИ температура заготовки «низкая», ТО увеличить температуру нагрева тэна индуктора И срабатывает автоматическое устройство исключения бракованных поковок в режиме «отсекатель»;

...

- ЕСЛИ температура штампа «оптимальная» и температура заготовки «оптимальная», ТО продолжить процесс без корректировки.

Для общего анализа разработанной нечеткой модели проведена визуализация нечёткого вывода, реализуемая в программе просмотра поверхности системы нечеткого логического вывода Matlab&Simulink при помощи расширения Fuzzy Logic Toolbox. Полученная поверхность позволяет проанализировать зависимость значений выходной переменной от отдельных входных переменных (рисунок 4).

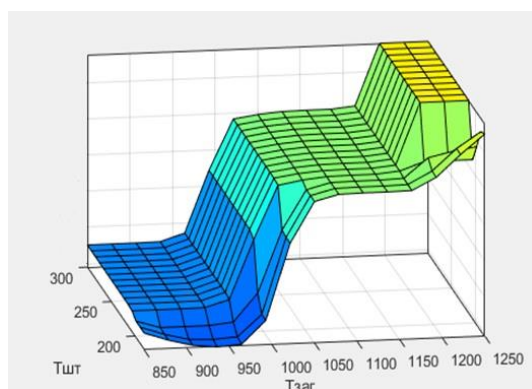


Рисунок 4 – Пример визуализации поверхности нечёткого вывода рассматриваемой модели в соответствии с входными переменными «Температура заготовки» – «Температура штампа» и выходной переменной «Поковка»

Управление процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес связано со сложным многокомпонентным технологическим поведением. Поэтому описание интеллектуальной системы управления целесообразно представить в виде графа переходов, который однозначно представляет структуру системы и набор правил, а также позволяет представить структуру, набор правил и связи компонентов.

Пример модели функционирования системы «Бункерное загрузочное устройство – индуктор – устройство исключения бракованных поковок» в виде графа представлен на рисунке 5.

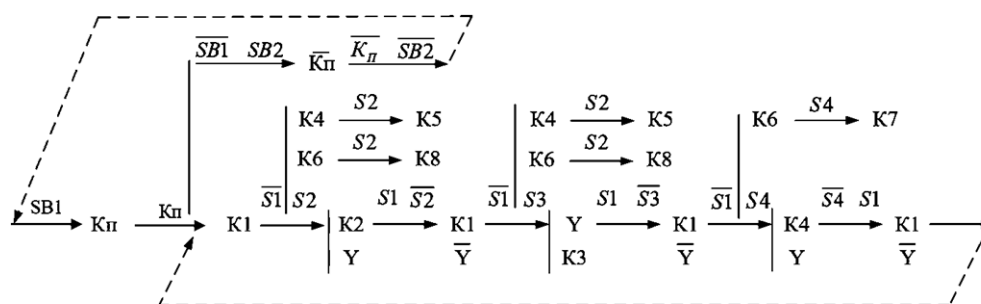


Рисунок 5 – Граф функционирования системы «Бункерное загрузочное устройство – индуктор – устройство исключения бракованных поковок»

**В третьей главе** разработана структурная модель системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес (рисунок 6). Логические функции в системе распределены по трем уровням: уровень датчиков и исполнительных механизмов, уровень управления в режиме реального времени, уровень поддержки принятия решений.

Нижний уровень - уровень датчиков и исполнительных механизмов. Датчики контролируют управляемые параметры, исполнительные механизмы воздействуют на параметры процесса для приведения их в соответствие с определенными алгоритмами интеллектуальной надстройки системы управления и для решения поставленной задачи с высокими требованиями к точности и функциям.

Основной задачей уровня управления в режиме реального времени является централизованная обработка данных, поступающих с нижнего уровня, отображение данных в режиме реального времени на панели мониторинга технологического процесса, а также выдача команды управления, в соответствии с запрограммированным алгоритмом управления, на исполнительные механизмы.

Верхний уровень – интеллектуальная надстройка, которая представлена уровнем поддержки принятия решений. Интеллектуальная надстройка основывается на многоагентной системе в совокупности с нечеткой логикой и выполняет поддержку многокритериальных решений в сложной информационной среде. На данном уровне выполняется выбор наилучшего решения из множества возможных и упорядочение возможных решений по предпочтительности.

База знаний является наиболее важной компонентой в представленной интеллектуальной системе, которая содержит структурированную информацию о технологическом процессе и в явном виде не присутствующую в базе данных.

Полноценная база знаний включает в себя правила вывода, допускающие автоматическое заключение о вновь вводимых фактах и, как следствие, осмысленную обработку информации (рисунок 7). Совокупность выявленных и утвержденных закономерностей технологического процесса преобразованы в нечетко- производственные правила и занесены в базу знаний.

Для формирования базы знаний в работе используются два подхода (рисунок 8 а, б). Первый подход направлен на пополнение БЗ формализованными знаниями экспертов на основе результатов практической деятельности и профессионального опыта в области ГОШ (рисунок 8, а). Второй подход основан на данных базы прецедентов, т.е. используются данные для поиска вариантов систем управления с аналогичными характеристиками методом «ближайшего соседа» (рисунок 8, б). Начальная база прецедентов формируется согласно методу извлечения прецедентов на основе знаний базы данных.

Для управления автоматизированными динамическими технологическими процессами, к которым относится прецизионная штамповка, функционирующая в условиях неопределенности, неполноты знаний и нечеткости описаний, наиболее подходящей является многоагентная система. Весь спектр задач технологического процесса по определенным производственным правилам распределен между агентами МАС (рисунок 9).

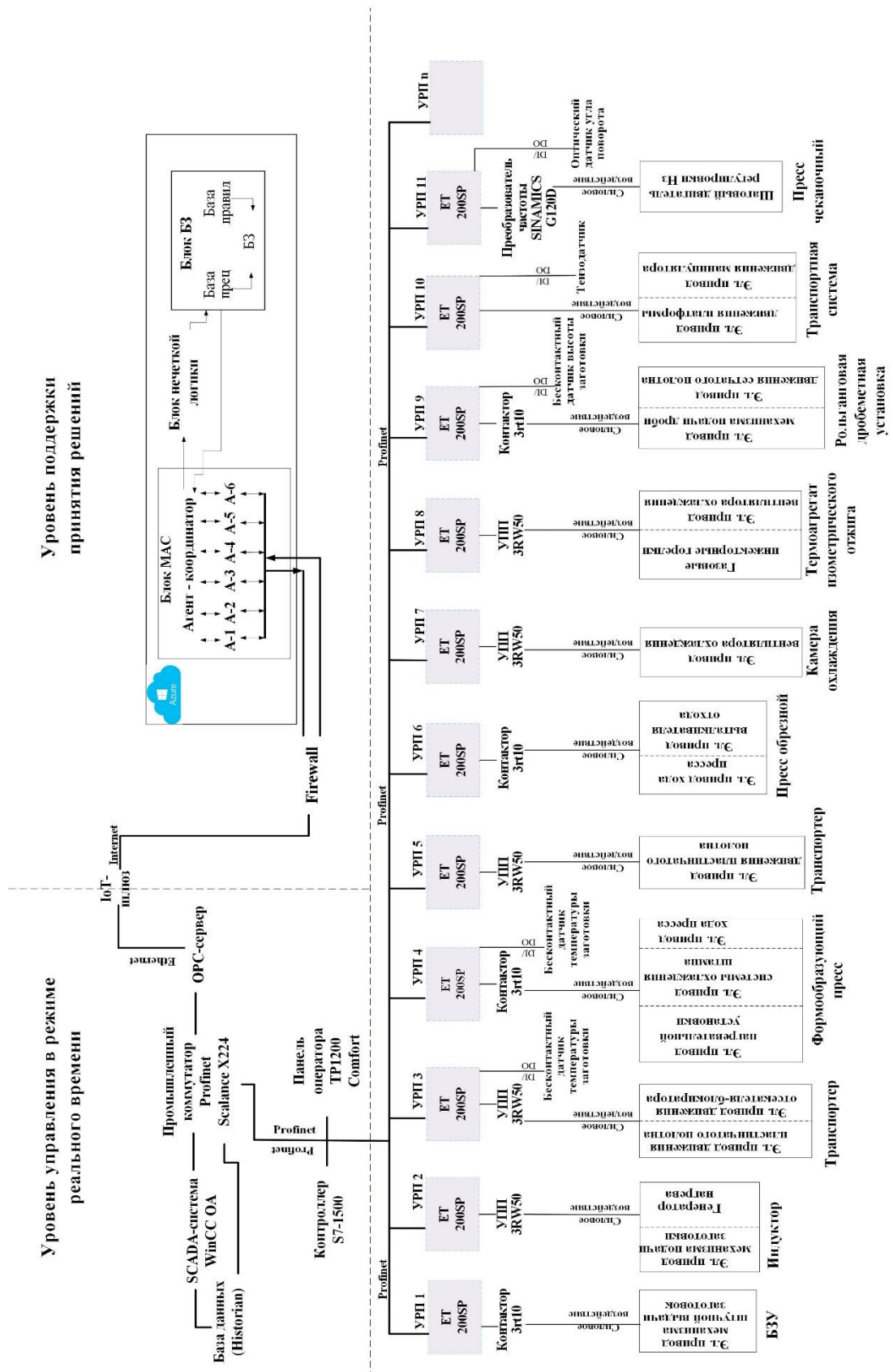


Рисунок 6 – Многоуровневая структурная модель системы управления технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентного подхода с нечеткой логикой

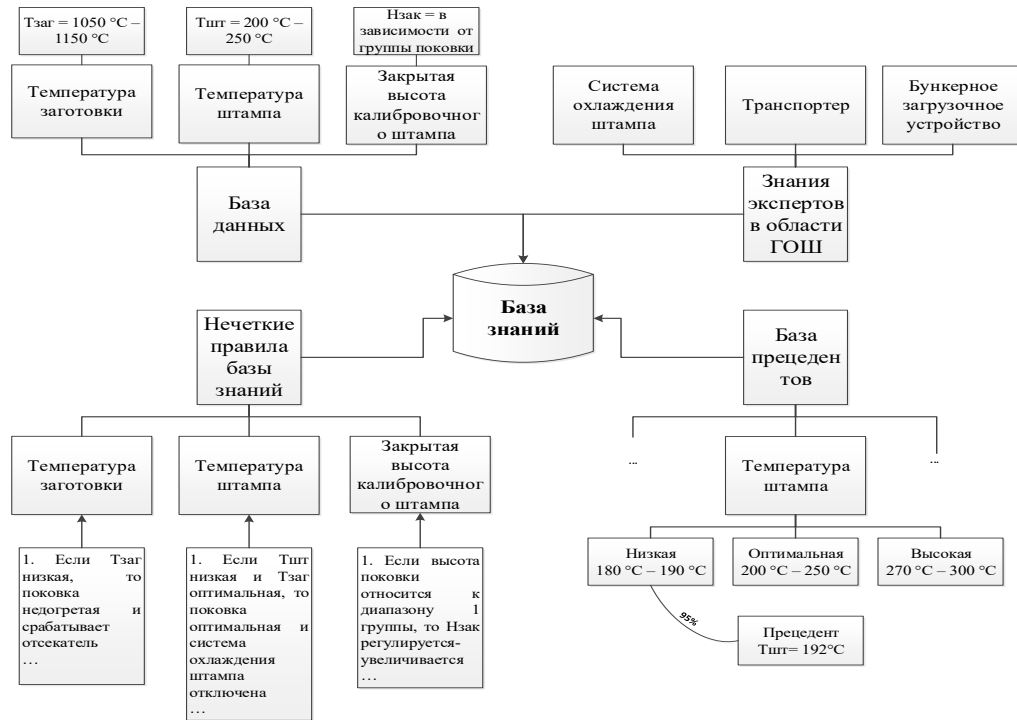


Рисунок 7 – Структура базы знаний системы управления процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес

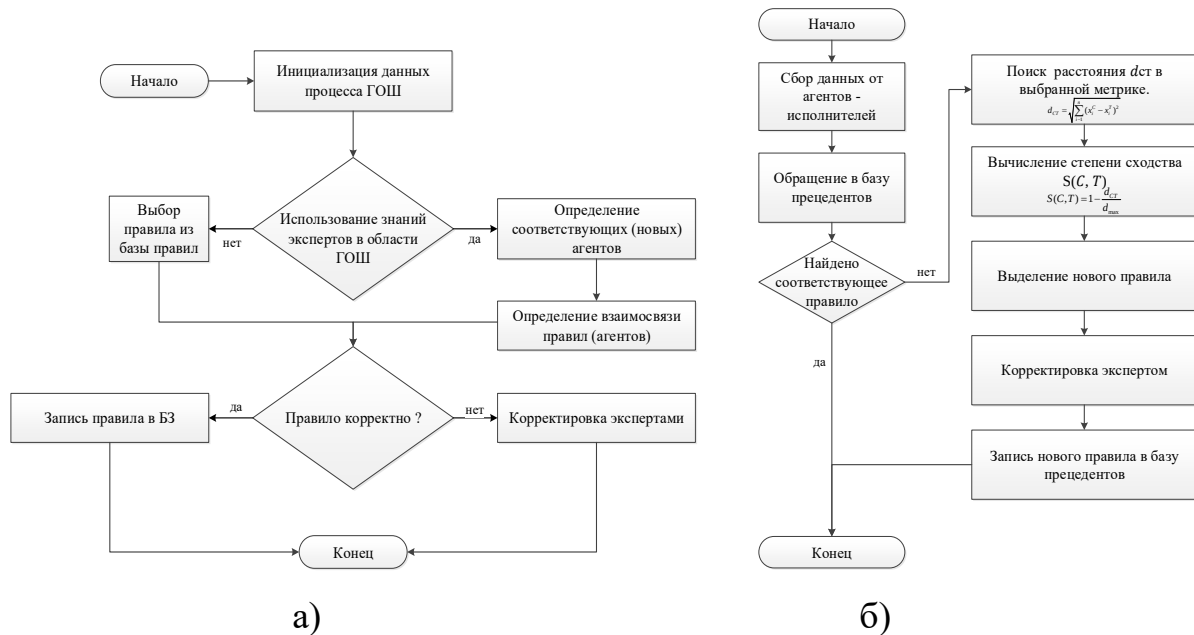


Рисунок 8 – Блок-схемы алгоритмов формирования базы знаний (а) и базы прецедентов (б) системы управления процессом прецизионной штамповки.

Агенты-исполнители выполняют слежение за работой соответствующего технологического узла агрегата реализуемого технологического процесса с помощью сигналов датчиков и, согласно заданию агента-координатора, выполняется связь с исполнительными механизмами агрегатов. Агент-координатор выполняет сбор данных от агентов-исполнителей, интеграцию частных результатов и посылает результат, полученный через блок нечеткого вывода из базы знаний

в виде продукционных правил агентам-исполнителям, которые будут исполнять данную задачу.

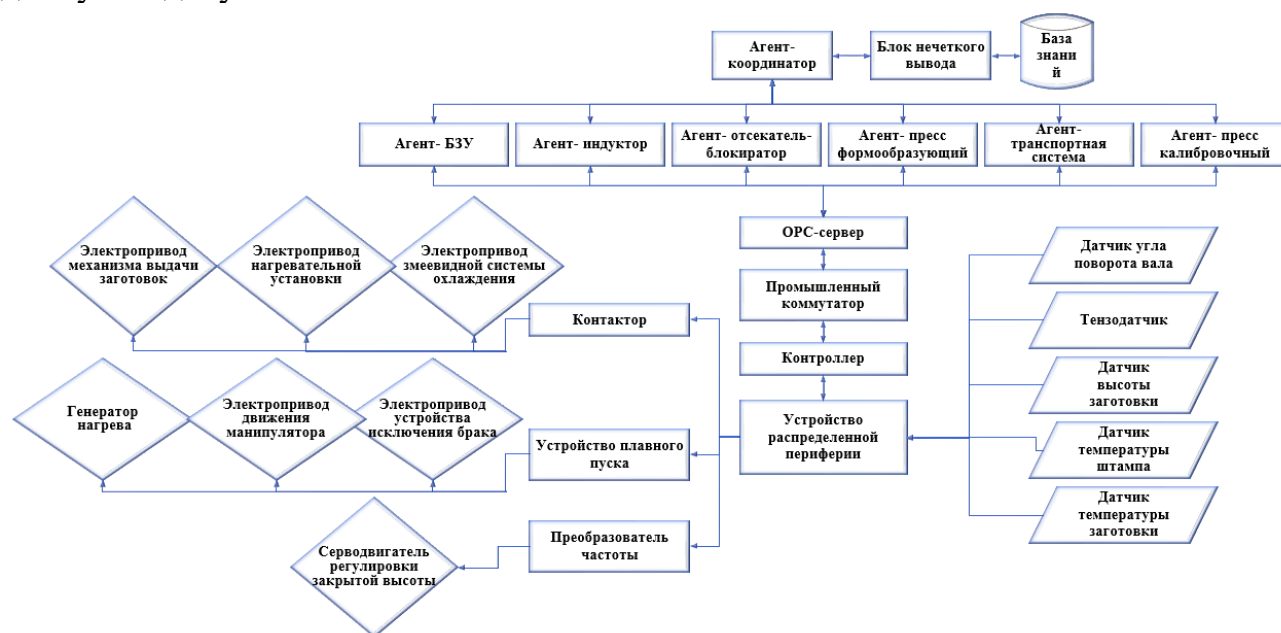


Рисунок 9- Структура многоагентной системы прецизионной штамповки зубчатых конических колес

**В четвертой главе** выполнена программная реализация системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес. Описанные выше принципы разработки положены в основу создания прототипа интеллектуальной системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентного подхода.

Управление технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе интеллектуальной системы выполнялось на экспериментальном горячештамповочном комплексе Кузнечного завода ПАО «КАМАЗ».

Целью экспериментальных исследований являлось выявление эффективности функционирования интеллектуальной системы управления технологическим процессом изготовления прецизионных зубчатых колес.

На примере калибровочной операции было рассмотрено тестирование алгоритма программного управления с помощью механизма оперативной регулировки закрытой высоты штампа чеканочного кривошипно-коленного прессы К8344 ус. 1000 т.с.

Схема прессы изображена на рисунке 10, где  $\Delta L$  – закрытая высота прессы на позиции калибровки;  $\varphi_{\text{ТЕК}}$  – текущее положение вала двигателя;  $\varphi_{\text{УПР}}$  – сигнал поворота на заданный угол вала серводвигателя механизма регулировки.

Эксперимент выполнялся в два этапа для поковок всех групп. На первом этапе калибровочная операция проводилась без регулировки закрытой высоты, т.е. при номинальном расстоянии между столом и ползуном в его нижнем положении 640 мм для всех заготовок.

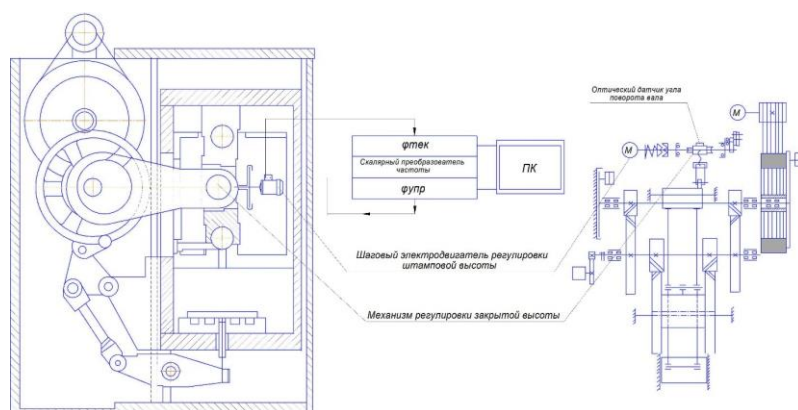


Рисунок 10 - Кинематическая схема, приборы и датчики экспериментального чеканочного кривошипно-коленного пресса K8344

На рисунке 11 представлен графический пользовательский интерфейс эксперта SCADA-системы калибровочной операции технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес.

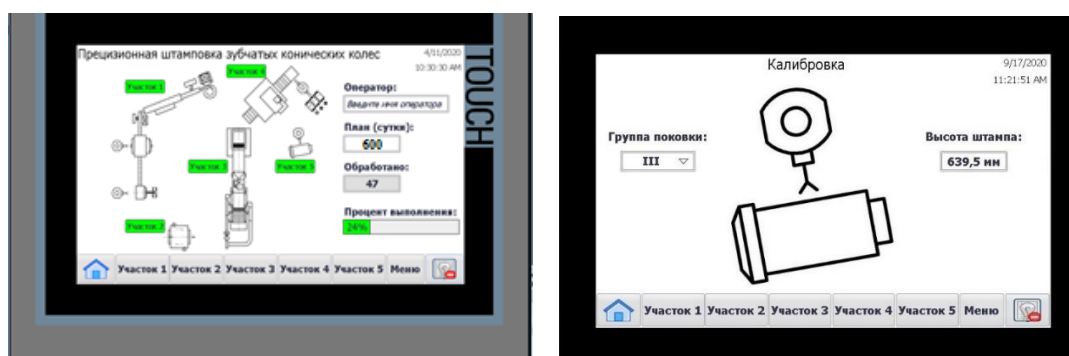


Рисунок 11 - Графический пользовательский интерфейс эксперта SCADA-системы технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес на примере калибровочной операции

На втором этапе рассматривалась калибровочная операция зубчатых конических колес с подрегулировкой закрытой высоты пресса с шагом регулировки 0,5 мм.

Проверка пятна контакта осуществлялась в сборочном узле «Межосевой дифференциал». Поковки, полученные на первом этапе, были покрыты пастой Permatex 80038 для определения пятен контакта и произвели вращение с зацеплением шестерни и сателлита на специальном приспособлении. В результате сопряжения зубчатых колес в сборочном узле межосевого дифференциала была выявлена неравномерность расположения пятен контакта по венцу зуба на опытных образцах I, II и III групп поковки (рисунок 12, а, б, в). На опытных образцах был определен показатель качества – площадь суммарного пятна контакта, который составил в среднем 45 % площади боковой поверхности зуба, по высоте площадь равна не более 40 % высоты зуба, а по длине – 55 %.

Закрашенная зона означает отсутствие контакта в результате сопряжения с ответным колесом. В собранном межосевом дифференциале такая неравномерность зазора приводит к неработоспособности узла в целом (отсутствует свободное вращение).



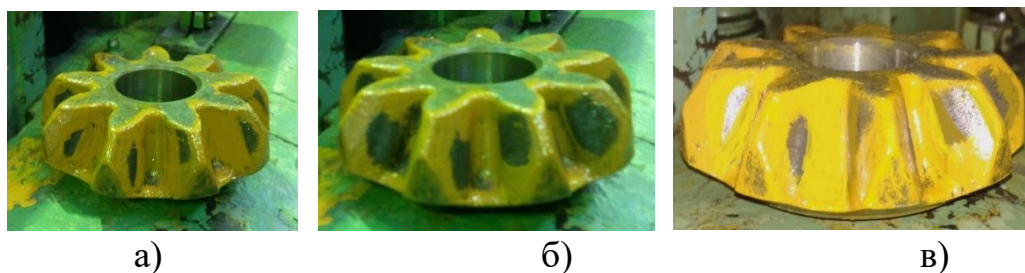


Рисунок 12 – Опытные образцы после калибровочной операции без регулировки закрытой высоты штампа

В результате второго этапа эксперимента (рисунок 13 а, б, в) было выявлено, что автоматическая регулировка закрытой высоты чеканочного прессы на опытных образцах I, II и III групп поковок обеспечивает точность формы и размеров изделия. Площадь суммарного пятна контакта стабильная и составила в среднем 60 % площади боковой поверхности зуба, по высоте площадь равна не менее 55% высоты зуба, а по длине – 60-65 %. Данные показатели соответствуют 7-й степени точности.

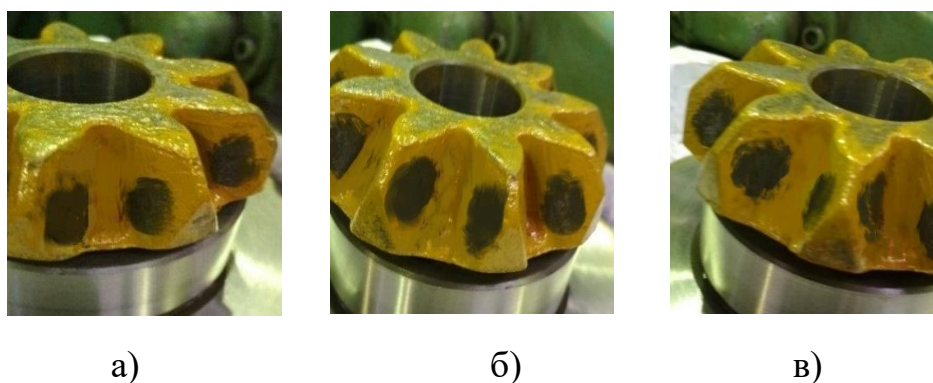


Рисунок 13 - Опытные образцы после калибровочной операции с автоматизированной регулировкой закрытой высоты штампа

Таким образом, можно утверждать, что полученная точность оперативной регулировки закрытой высоты будет достигаться во всех интервалах.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом диссертационной работы является решение научной задачи, которая заключается в обеспечении требуемых показателей качества зубчатых конических колес при повышении производительности путем автоматизации производства и интеллектуальной поддержки процесса управления прецизионной штамповки.

При проведении исследований по тематике диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Согласно информационно-аналитическому обзору выявлено, что в результате повышения требований к точности параметров зубчатых колес имеется необходимость внедрения в производство ориентированной модели управления, реализуемой с помощью инструментов искусственного интеллекта, наиболее оптимальным из которых является многоагентная система для



организации интеллектуальной поддержки принятия решений технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых колес.

2. Определены закономерности показателей качества изделия от параметров технологического процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес в системе управления, с целью формирования правил базы знаний интеллектуальной надстройки.

3. Разработан способ управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес с применением элементов искусственного интеллекта.

4. Разработана модель формализованного описания работы элементов системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес в виде графа функционирования, позволяющего представить структуру и набор правил, а также смоделировать движение и связи системы.

5. Разработана многоуровневая структурная модель системы управления технологическим процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе элементов искусственного интеллекта, обеспечивающая требуемый контроль параметров процесса.

6. Разработана прикладная программа системы управления, обеспечивающая повышение качества зубчатых конических колес с необрабатываемым зубчатым профилем; на основе калибровочной операции опытной партии зубчатых конических колес из стали 18ХГР в количестве 200 штук было выявлено увеличение показателя суммарного пятна контакта с 45% до 60% , что соответствует 7-й степени точности.

Таким образом, в диссертации на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача развития и применения систем управления технологическими процессами на основе нечетких правил базы знаний интеллектуальных систем, имеющая важное хозяйственное значение в различных областях человеческой деятельности.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в периодических изданиях из перечня ВАК*

1. Гавариева, К.Н. Разработка базы знаний для системы нечеткого логического вывода процесса прецизионной штамповки / Л.А. Симонова, К.Н. Гавариева // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 1. С. 62-64.

2. Гавариева, К.Н. Разработка системы автоматического управления прецизионной штамповкой на основе математического моделирования / Р.В. Гавариев, К.Н. Гавариева // Современные наукоёмкие технологии. 2020. №8. С. 20-24

3. Гавариева, К.Н. Нечеткое регулирование процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентного подхода / К.Н. Гавариева, Л.А. Симонова, В.В. Абрамова // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 9. С. 19-22.

*Статьи, опубликованные в изданиях Web Of Science и Scopus:*

4. Gavarieva, K.N. Influence of multilayer coatings on the operational stability of molds for injection molding / K.N. Gavarieva, R.V. Gavariev, D.L. Pankratov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 134 (2016) 012031 doi:10.1088/1757-899X/134/1/012031

5. Gavarieva, K.N. Development of expert systems for modeling of technological process of pressure casting on the basis of artificial intelligence / K.N. Gavarieva, L.A. Simonova, D.L. Pankratov, R.V. Gavariev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 240 (2017) 012019 doi:10.1088/1757-899X/240/1/012019

6. Gavarieva, K.N. Application of multi-agent system for control of parameters of precision stamping process of bevel gears / K.N. Gavarieva, L.A. Simonova, D.L. Pankratov, V.G. Shibakov, R.V. Gavariev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412 (2018) 012020 doi:10.1088/1757-899X/412/1/012020

*Научные статьи и материалы докладов:*

7. Гавариева, К.Н. Применение многоагентной системы для усовершенствования управления процессом прецизионной штамповки зубчатых конических колес / К.Н. Гавариева, С.М. Астраханцева // Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научно-практической конференции. В 3-х томах. - 2017. – Т.1. - С. 158-160.

8. Гавариева, К.Н. Проектирование системы управления процессом энергосберегающей прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентных систем / К.Н. Гавариева, Л.А. Симонова, Р.В. Шибаков, Р.В. Гавариев, А.С. Кирсанов // Энергосбережение. Наука и образование. Сборник докладов международной конференции. - 2017. - С. 549-553.

9. Гавариева, К.Н. Применение многоагентной системы для управления параметрами процесса прецизионной штамповки зубчатых конических колес / К.Н. Гавариева, Л.А. Симонова, Д.Л. Панкратов, В.Г. Шибаков, Р.В. Гавариев // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2017 (МНТК "ИМТОМ-2017") Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 128-132.

10. Гавариева, К.Н. Применение нечеткой логики для управления параметрами технологического процесса прецизионной штамповки / К.Н. Гавариева, Л.А. Симонова // Материалы IX Международной научно-технической конференции "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2018" (МНТК "ИМТОМ-2018") Материалы IX Международной научно-технической конференции. 2018. С. 155-158.