

На правах рукописи



**Романов Александр Васильевич**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРОПРЕССОВОЙ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ  
С НАТЯГОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАТРОННОГО ПРЕССА**

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

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

Ижевск 2017

Работа выполнена на кафедре «Мехатронные системы» ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

**Научный руководитель**      **Абрамов Андрей Иванович**  
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Мехатронные системы» ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

**Официальные оппоненты**      **Кульга Константин Станиславович**  
д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

**Костарев Сергей Николаевич**  
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», ФГКВУ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации»

**Ведущая организация**      ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Защита состоится «15» марта 2018 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Сяктерев Виктор Никонович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Одной из наиболее прогрессивных технологий получения соединений с натягом является гидропрессовый метод сборки, в основе которого лежит создание между контактирующими поверхностями собираемых деталей масляной прослойки под высоким давлением, вследствие чего, взаимное перемещение сопрягаемых поверхностей вала и втулки (под действием осевого усилия прессы) происходит в условиях жидкостного и граничного трения.

Основным показателем качества соединения с натягом является его прочность. Под прочностью посадки с натягом понимается ее способность передавать крутящий момент  $M_{кр}$  и осевые нагрузки (определяемые по усилию распрессовки  $P_p$ ) без взаимного проскальзывания деталей: чем она выше для данного натяга и диаметра сопряжения, тем выше качество. На нагрузочную способность соединения ключевое значение оказывает обеспечение режима жидкостного трения при сборке, что гарантирует сохранность сопрягаемых поверхностей и прочность получаемого соединения.

Повышение производительности сборки, ее стабильность, а также обеспечение качества гидропрессовых соединений возможны на основе автоматизации сборочного процесса, позволяющей в полной мере реализовать достоинства данного метода сборки.

Протекание процесса сборки и качество собранного соединения зависит от многих факторов: давления, расхода и вязкости рабочей жидкости, скорости выполнения операции сборки, технологической схемы и прессового оборудования и т.д, изменение данных параметров происходит до предельных значений и не регулируется, что отрицательно сказывается на стабильности процесса запрессовки, нагрузочной способности собираемого соединения с натягом.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемы технологии и НС соединений с натягом отражены в работах отечественных ученых: Андреева Г.Я., Балацкого Л.Т., Берникера Е.И., Виноградовой М.Д., Гречищева И.С., Малицкого И.Ф., Мейстера Р.Р., и зарубежных Кардса Д., Роота Г., Вюртца Г., Коха Р. и др.

Коэффициенты трения, влияющие на НС неподвижных соединений, работающих в зоне упругих деформаций, рассмотрены в работах Баранова Н.К., Бежелуковой Е.Ф., Крагельского И.В. и др.

Исследования Колмогорова В.Л., Колмогорова Г.Л., Малинина Н.Н. и др. направлены на изучение упругопластического деформирования материалов в условиях жидкостного трения.

Коллективом ученых ИжГТУ имени М.Т. Калашникова под руководством

профессора Абрамова И.В. исследованы вопросы технологии и методики расчета гидропрессовых соединений с натягом.

В нашей стране исследованиями гидропрессовой сборки в разное время занимались ЦНИИ Буммаш (г. Санкт-Петербург), ВНИИМетМаш (г. Москва), технология сборки освоена в машиностроительной, металлургической, железнодорожной и судостроительной отраслях. За рубежом работы в данной области проводятся рядом фирм Японии, Швеции (SKF), Германии (FAG), в научных учреждениях Украины (НТУ ХПИ).

Проведенный анализ показал, что усилиями отечественных и зарубежных ученых созданы предпосылки для автоматизации гидропрессовой сборки на основе современных методов и систем управления процессом запрессовки, что позволит обеспечить качество получаемых соединений и повысить производительность сборки.

### **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: 1. Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки; 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 гидропрессовая сборка соединений с натягом.

**Предметом исследования** является управление технологическим комплексом и процессом гидропрессовой сборки.

### **Цель работы**

Повышение производительности и качества гидропрессовой сборки соединений с натягом путем автоматизации с применением мехатронного пресса.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ применимости существующего прессового оборудования для автоматизированной гидропрессовой сборки и определить требования для установления параметров автоматизированного технологического комплекса, учитывающего специфику гидропрессовой сборки и ее идентификационные характеристики.

2. Разработать математическую модель мехатронного пресса с качающейся траверсой.

3. Обосновать выбор способа синхронизации движения параллельных мехатронных модулей, учитывающего специфику гидропрессовой сборки.

4. Разработать систему автоматического управления технологическим комплексом гидропрессовой сборки с использованием методов нечеткой логики.

5. Апробировать технологический комплекс с системой управления автоматизированной гидропрессовой сборкой соединений с натягом с подводом масла с торца соединения.

**Научная новизна** работы заключается в том, что:

1. Разработана математическая модель движения рабочего органа пресса, отличающаяся учетом состояния технологического процесса гидропрессовой сборки, а именно: текущих значений давления масла, силы и длины запрессовки.

2. Предложен способ синхронизации движения параллельных осей, учитывающий специфику гидропрессовой сборки и отличающийся от существующих способов синхронизации ротацией роли «ведущий-ведомый» между осями.

3. Получено решение задачи управления системой гидропрессовой сборки на основе аппарата нечеткой логики с учетом требований к качеству гидропрессовых соединений по критерию нагрузочной способности.

4. Применено управляющее воздействие на объект в виде регулирования скорости запрессовки вала, обеспечивающего поддержание основного технологического параметра – давления масла – в требуемом диапазоне.

**Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Обоснован закон движения рабочего органа мехатронного пресса, основанный на комплексе обратных связей, а также закон управления технологическим комплексом на основе нечеткой логики и выбора управляющего воздействия в виде регулирования скорости гидропрессовой сборки.

2. Создан технологический комплекс для автоматизированной гидропрессовой сборки соединений с натягом и разработаны рекомендации по использованию полученных результатов на производстве.

**Методология и методы исследований**

Для решения поставленных задач использованы основные научные положения мехатроники, механики твердого деформируемого тела, теории гидропрессовой сборки, гидромеханики, микропроцессорных систем, интеллектуальных систем управления. При разработке алгоритмов, систем автоматического управления мехатронным прессом и технологическим комплексом гидропрессовой сборки использованы методы идентификации, компьютерного моделирования, программирования, теории автоматического управления.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Обоснованы требования к процессу гидропрессовой сборки, обеспечивающие повышение ее производительности и качество получаемых соединений с натягом, такие как: наличие обратных связей по давлению масла и положению запрессовываемой детали, а также выполнение условия невозникновения пластических деформаций (*соответствует п. 1 паспорта специальности*).

2. Разработана математическая модель мехатронного пресса, включающая закон движения рабочего органа пресса и обратные связи, учитывающие состояние технологического процесса гидропрессовой сборки (давление масла, силу и длину запрессовки), и обеспечивающая сохранение постоянства давления масла (*соответствует п. 4 паспорта специальности*).

3. Предложен модифицированный способ синхронизации движения параллельных мехатронных модулей, обеспечивающий снижение рассинхронизации между ними по сравнению со способами: параллельного управления – в 1,5 раза, «ведущий-ведомый» – в 2,6 раза, а также центрируемость собираемых деталей и сохранность масляной прослойки между деталями (*соответствует п. 4 паспорта специальности*).

4. Разработана система управления технологическим комплексом гидропрессовой сборки с применением методов нечеткой логики, обеспечивающая управление технологическими режимами сборки, а, именно: поддержание давления масла в заданном диапазоне (*соответствует п. 3 паспорта специальности*).

5. Разработан и создан опытный образец технологического комплекса гидропрессовой сборки соединений с натягом, позволяющий собирать соединения с диаметром сопряжения до 50 мм в автоматизированном режиме (*соответствует п. 1 паспорта специальности*).

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается применением современных методов анализа и синтеза мехатронных систем, применением методов математического и компьютерного моделирования, статистических методов планирования и обработки экспериментов; методами обработки экспериментальных данных с использованием ЭВМ; достаточным объемом экспериментальных данных.

По результатам проведенных исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе: публикации в зарубежных журналах – 2; в журналах из перечня ВАК – 4; в трудах научно–технических конференций и выставок – сессий – 4; получен патент на полезную модель.

Основные положения диссертационной работы докладывались на II

Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием (г. Ижевск, 2013), открытым конкурсе инновационных проектов ОАО «Концерн Калашников» (г. Ижевск, 2014), XVIII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов (г. Ижевск, 2014), Международной школе молодых ученых и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. (г. Москва, 2016).

Диссертационные исследования выполнены в рамках НИР по теме «Разработка и исследование интеллектуальных систем управления мехатронными объектами» в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации (номер государственной регистрации НИР 01201262580 2012– 2013 г.г. ), НИР по теме «Разработка интеллектуальных систем управления и диагностики мехатронными приводами» в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации (номер государственной регистрации НИР 114030440070 2014-2016 г.г.).

#### **Личный вклад автора**

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

Идентификация параметров и формирование физической модели гидропрессовой сборки выполнены в соавторстве с д.т.н., профессором кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова Абрамовым И.В.

Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены автором при активном участии научного руководителя к.т.н., доцента Абрамова А.И.

В перечисленных работах соискателем лично получены следующие результаты:

- в работе [2] рассмотрены научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки, формулирующие основные математические зависимости процесса и устанавливающие требования к технологическому оборудованию;

- в работе [44] разработана динамическая модель мехатронного модуля на базе вентильного электродвигателя и роликвинтовой передачи, учитывающая характерные особенности данного преобразователя движения;

- в работе [7] предложен модифицированный способ синхронизации, проведены вычислительный и натурный эксперименты, показывающие его эффективность;

- в работе [8] разработана конструкция мехатронного пресса с

параллельными осями с нежесткой кинематической связью между ними;

– в работе [4] рассмотрена возможность использования прессы для сборки соединений из хрупких материалов;

– в работе [10] разработана система автоматического управления мехатронным прессом на базе нечеткой логики, проведен вычислительный эксперимент;

– в работах [3, 11] предложены структура и конструкция неавтоматизированного и автоматизированного регуляторов давления масла, проведены натурные эксперименты;

– в работе [5] предложена конструкция регулятора избыточного объема масла;

– в работе [9] предложена структура информационно-измерительной системы установки для автоматизированной гидропрессовой сборки;

– в работе [1] рассмотрены вопросы эффективности гидропрессовой сборки титановых соединений, проведен вычислительный эксперимент по определению их нагрузочной способности.

Опубликованные работы отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – [2]; по главе 2 – [4, 7]; по главе 3 – [8, 10]; по главе 4 – [1, 2, 3, 5, 9, 11]. Одна работа написана автором лично, другие совместно с научным руководителем или другими членами научного коллектива.

#### **Реализация результатов работы**

Научно-технические результаты диссертационной работы приняты к использованию в производственном процессе на предприятии АО «Концерн «Калашников».

Результаты диссертационной работы используются на кафедре «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова для обучения студентов по направлениям 15.03.06, 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

#### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения 4-х глав и заключения. Изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит библиографический список из 129 наименований, 3 приложения.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** дан обзор литературных данных по рассматриваемому вопросу, проведен анализ прессового оборудования для сборки гидропрессовых соединений, рассмотрены проблемы автоматизации гидропрессовой сборки, проанализированы требования к автоматизированной сборке, освещено современное состояние оборудования с параллельной кинематикой и методов управления им.

Проведенный анализ прессового оборудования серийно выпускаемого промышленностью выявил определенные недостатки, применительно к гидропрессовой сборке, наиболее существенным является невозможность управления скоростью штока пресса в процессе сборки.

Выявлено, что требованиям для управления процессом гидропрессовой сборки наиболее удовлетворяет прессовое оборудование с электроприводом, обладающее возможностью использования большого числа обратных связей и регулирования скорости движения штока пресса.

**Во второй главе** приводятся обоснование выбора кинематической схемы пресса, представлены математическая модель движения мехатронного пресса на базе ВЭД и РВП, результаты анализа способов синхронизации осей с параллельной кинематикой, приведен новый способ синхронизации осей.

Кинематическая схема мехатронного пресса с параллельной кинематикой представлена на рисунке 1.

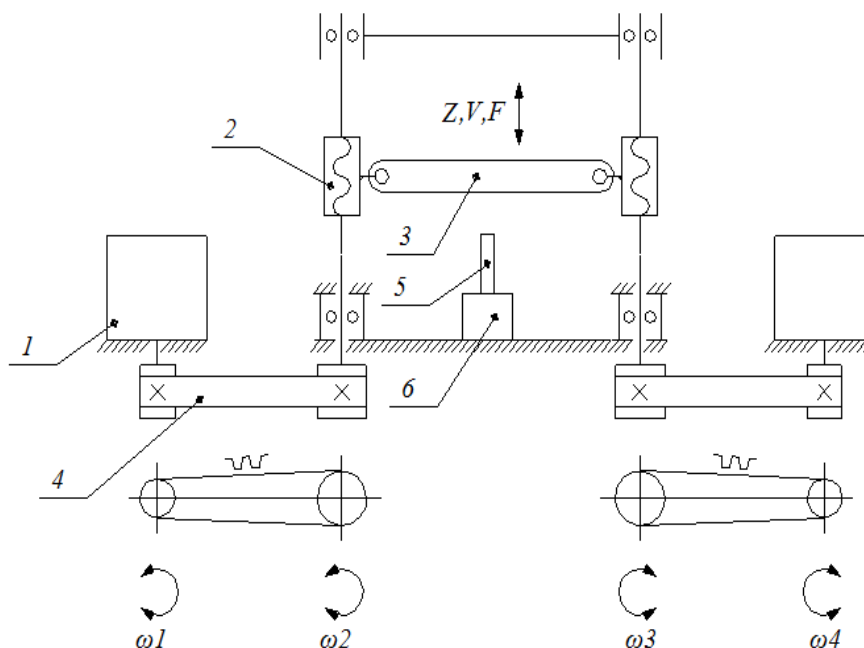


Рисунок 1 – Кинематическая схема пресса

- 1 – вентильный электродвигатель; 2 – роликовинтовая передача;  
3 – траверса; 4 – зубчатая ременная передача; 5 - запрессовываемый вал;  
6 - втулка

Данная схема позволяет реализовать повышенные характеристики в части создания значительных усилий и компенсации динамических колебаний.

При разработке расчетной схемы приняты следующие допущения: жесткость винта и гайки неизменна; массой роликов при расчете инерции механизма, трением в соединении траверсы с гайкой роликовинтовой передачи и в зубчатой РП пренебрегаем; трение в подшипниковых опорах и передаче винт-гайка подчиняется закону Кулона-Амонтона; возможные погрешности изготовления деталей не учитываются.

Расчетная схема представлена на рисунке 2.

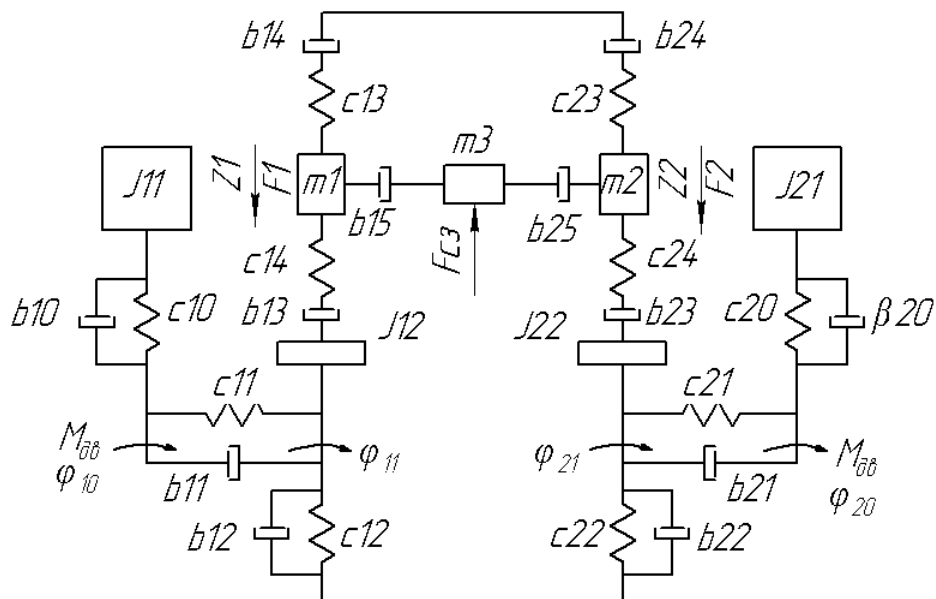


Рисунок 2 – Расчетная схема мехатронного пресса

Использованы следующие обозначения:

$J_{11}, J_{21}$  - моменты инерции двигателя и ведущего шкива мехатронных модулей движения 1, 2 соответственно;  $J_{12}, J_{22}$  - момент инерции ведомого шкива и роликовинтовой передачи -/-;  $m_1, m_2$  - масса гайки -/-;  $m_3$  - масса траверсы с воздействующей на нее осевой силой;  $\beta_1$  - коэффициент демпфирования ременной передачи;  $\beta_{10}, \beta_{12}, \beta_{14}, \beta_{20}, \beta_{22}, \beta_{24}$  - коэффициенты демпфирования в подшипниках -/-;  $\beta_{13}, \beta_{23}$  - коэффициент демпфирования в РВП -/-;  $c_{10}, c_{20}$  - жесткость вала двигателя и его опоры -/-;  $c_{11}, c_{21}$  - жесткость ременной передачи -/-;  $c_{12}, c_{22}$  - жесткость опоры винта -/-,  $c_{13}, c_{23}$  - жесткость РВП -/-,  $c_{14}, c_{24}$  - жесткость винта -/-;  $M_{ДВ}$  - момент на валу двигателя -/-;  $\phi_{10}, \phi_{20}$  - угол поворота вала двигателя -/-;  $\phi_{11}, \phi_{21}$  - углы поворота винта -/-;  $Z_1, Z_2$  - перемещение гайки -/-;  $F_1, F_2$  - осевое усилие развиваемое -/-,  $F_{c3}$  - сила сопротивления при сборке, равная силе запрессовки  $F_3$  (зависит от длины запрессовки и давления масла) по величине и противоположная по направлению.

Дифференциальные уравнения движения мехатронного пресса по обобщенным координатам записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
J_{11}\ddot{\varphi}_{10} &= -c_{10}\varphi_{10} - c_{11}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) - c_{12}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) - c_{14}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) - \\
&- b_{10}\dot{\varphi}_{10} - b_{11}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) - b_{12}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) - b_{14}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) + M_{дв}, \\
J_{12}\ddot{\varphi}_{11} &= c_{11}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) + c_{12}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) - c_{13}(\varphi_{11}-z_1) + \\
&+ c_{14}(\varphi_{10}-\varphi_{11}) + b_{11}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) + b_{12}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) - b_{13}(\dot{\varphi}_{11}-\dot{z}_1) + \\
&+ b_{14}(\dot{\varphi}_{10}-\dot{\varphi}_{11}) + \eta_1\eta_2i_{рзп}M_{дв}, \\
(m_1 + m_3/2)\ddot{z}_1 &= c_{13}(\varphi_{11}-z_1) + b_{13}(\dot{\varphi}_{11}-\dot{z}_1) + \eta_1\eta_2\eta_3F_1 - \frac{F_{сз}}{2}, \\
J_{21}\ddot{\varphi}_{20} &= -c_{20}\varphi_{20} - c_{21}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) - c_{22}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) - c_{24}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) - \\
&- b_{20}\dot{\varphi}_{20} - b_{21}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) - b_{22}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) - b_{24}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) + M_{дв}, \\
J_{22}\ddot{\varphi}_{21} &= c_{21}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) + c_{22}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) - c_{23}(\varphi_{21}-z_2) + \\
&+ c_{24}(\varphi_{20}-\varphi_{21}) + b_{21}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) + b_{22}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) - b_{23}(\dot{\varphi}_{21}-\dot{z}_2) + \\
&+ b_{24}(\dot{\varphi}_{20}-\dot{\varphi}_{21}) + \eta_1\eta_2i_{рзп}M_{дв}, \\
(m_2+m_3/2)\ddot{z}_2 &= c_{23}(\varphi_{21}-z_2) + b_{23}(\dot{\varphi}_{21}-\dot{z}_2) + \eta_1\eta_2\eta_3F_2 - \frac{F_{сз}}{2}
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Уравнения движения (1) трансформированы под требования среды SimMechanics среды Simulink, а результаты решения применяются при оценке способов синхронизации осей и разработке системы автоматического управления прессом.

В работе предложен модифицированный способ синхронизации, заключающийся в ротации роли «ведущего-ведомого» между осями (в качестве ведущей выбирается ось с нулевым либо минимальным рассогласованием), ведомая ось разгоняется либо затормаживается в зависимости от рассогласования от заданной позиции, либо от позиции ведущей оси.

Основой алгоритма является условие смены функции «ведущего-ведомого», определяемое как:

$$\left. \begin{aligned}
&\text{если } (Z_{\varphi 1} > Z_{\varphi 2}) \&\& (|\Delta Z_{OC}| < \Delta Z_{OC\_M}) \&\& (|\Delta Z_1| > |\Delta Z_2|), \text{ то } Z_{3AD1} = Z_{\varphi 2}, \\
&\text{если } (Z_{\varphi 1} > Z_{\varphi 2}) \&\& (|\Delta Z_{OC}| < \Delta Z_{OC\_M}) \&\& (|\Delta Z_1| < |\Delta Z_2|), \text{ то } Z_{3AD2} = Z_{\varphi 1}, \\
&\text{если } (Z_{\varphi 1} < Z_{\varphi 2}) \&\& (|\Delta Z_{OC}| < \Delta Z_{OC\_M}) \&\& (|\Delta Z_1| > |\Delta Z_2|), \text{ то } Z_{3AD1} = Z_{\varphi 2}, \\
&\text{если } (Z_{\varphi 1} < Z_{\varphi 2}) \&\& (|\Delta Z_{OC}| < \Delta Z_{OC\_M}) \&\& (|\Delta Z_1| < |\Delta Z_2|), \text{ то } Z_{3AD2} = Z_{\varphi 1}
\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Delta Z_{OC} = Z_{\varphi 1} - Z_{\varphi 2}$  – рассинхронизация осей;

$Z_{\varphi 1}, Z_{\varphi 2}$  – фактическое положение гайки 1,2;

$|\Delta Z_1| = |Z_{3AD} - Z_{\varphi 1}|$  – абсолютное рассогласование по положению гайки 1;

$|\Delta Z_2| = |Z_{3AD} - Z_{\varphi 2}|$  – абсолютное рассогласование по положению гайки 2;

$Z_{3AD}$  – заданное положение траверсы с модуля задания положения;

$\Delta Z_{OC\_M}$  – максимально допустимая рассинхронизация осей.

Проведен сравнительный анализ существующих (параллельного управления и управления «ведущий-ведомый») и модифицированного способов синхронизации осей мехатронного пресса.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования способов синхронизации осей

Способ синхронизации	Максимальная рассинхронизация $ \Delta Z_{oc} $ , мкм	
	холостой ход	под нагрузкой
Параллельное управление	9	83
Управление по принципу «ведущий-ведомый»	7	147
Модифицированный способ синхронизации	5	56

Проведенное моделирование показало, что модифицированный способ синхронизации обеспечивает уменьшение рассинхронизации между осями по сравнению со способами параллельного управления и управления «ведущий-ведомый».

**В третьей главе** представлена система автоматического управления прессом и результаты вычислительного и натурального экспериментов.

В качестве системы управления используется система управления с нечетким выводом, позволяющая обеспечить регулирование в динамических режимах (рисунок 3).

Задающий сигнал положения по каждой оси  $Z_{зад}k$ , где  $k$  - ось 1,2, сравнивается с сигналом о фактическом положении траверсы по данной оси  $Z_{факт}k$ , полученным с датчика положения. В качестве входных переменных нечеткого регулятора положения используются рассогласование по положению  $\Delta Zk = Z_{зад}k - Z_{факт}k$ , первая  $\Delta Z'k$  (скорость рассогласования) и вторая  $\Delta Z''k$  (ускорение рассогласования) производные, что соответствует дискретному ПИД-регулятору (нечеткий ПИД- регулятор с инкрементным регулированием). Диапазоны изменения лингвистических переменных  $\Delta Zk$ ,  $\Delta Z'k$  разбиты на пять перекрывающихся друг друга множеств, а лингвистическая переменная  $\Delta Z''k$  - на три множества. Лингвистическая переменная «управляющее воздействие» описывается семью терм-множествами.

База правил регулятора сформулирована на основании диапазонов разбиения лингвистических переменных, при этом использовалось предположение о том, что большему рассогласованию по положению должно соответствовать большее управляющее воздействие.

Правила формируются по типу ЕСЛИ ... И ... И, ТО ...

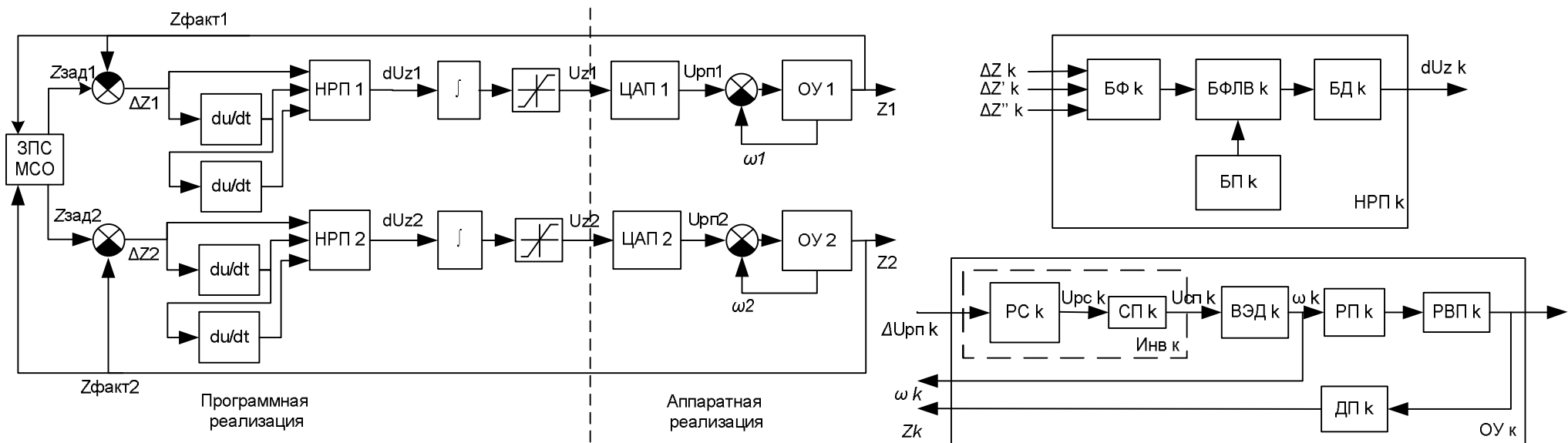


Рисунок 3 – Функциональная схема системы автоматического управления мехатронным прессом на базе нечеткой логики

ЗПС – задание на положение и скорость; МСО – модуль синхронизации осей; НРП 1, 2 – регуляторы положения осей 1,2, включающие БФ k – блоки фаззификации, БФЛВ k – блоки формирования логического вывода, БД k – блоки дефаззификации, БП k – базы правил; ЦАП k – цифро-аналоговые преобразователи, ОУ k – объекты управления, состоящих из инверторов Инв k, включающих в себя регуляторы скорости РС k и силовые преобразователи СП k, ВЭД k – вентильных электродвигателей, РП k – ременных передач, РВП k – роликвинтовых передач, ДП k – датчиков положения;  $dUz k$  – приращение управляющего воздействия регулятора положения,  $dUz k$  – управляющее воздействие регулятора положения,  $Uпр k$  – управляющее воздействие ЦАП k,  $Uпр k$  – управляющее воздействие регулятора скорости,  $Uсп k$  – управляющее воздействие силового преобразователя,  $\omega k$  – угловая скорость ВЭД

Для оценки работы системы управления проведено имитационное моделирование в пакете Simulink среды Matlab с использованием математической модели мехатронного пресса при следующих значениях параметров системы:

- нагрузка  $F_{C3}$  от силы запрессовки  $F_3$  равна 0 и 18 кН;
- скорость перемещения  $V$ : 30, 40, 50 мм/с;
- ускорение  $a$ : 200 мм/с<sup>2</sup>;
- перемещение  $Z$ : 120, 200 мм.

Результаты моделирования системы управления при следующих характеристиках системы:  $L=200$  мм,  $V=40$  мм/с,  $a=200$  мм/с<sup>2</sup>,  $F_{C3} = 18$  кН, представлены на рисунках 4, 5.

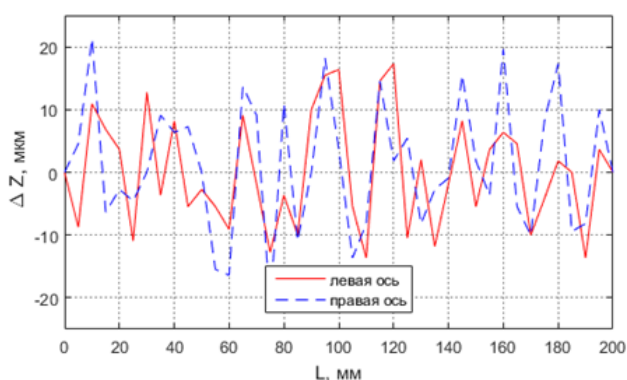


Рисунок 4 – Рассогласование (под нагрузкой)

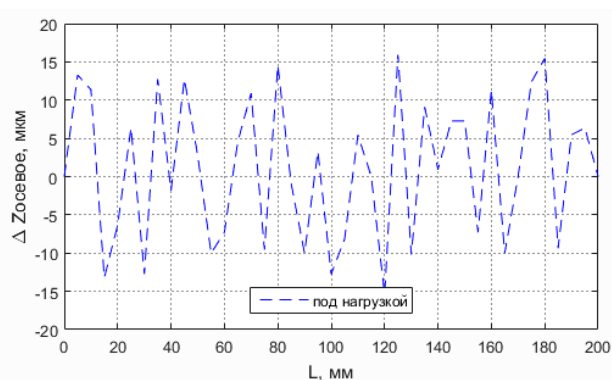


Рисунок 5 – Рассинхронизация (под нагрузкой)

Результаты моделирования работы пресса с нечеткой системой управления приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования пресса

Максимальное рассогласование по оси $ \Delta Z $ , мкм		Максимальная рассинхронизация $ \Delta Z_{осевое} $ , мкм	
холостой ход	под нагрузкой	холостой ход	под нагрузкой
19,1	20,9	8,2	15,5

Оценка работы разработанного мехатронного пресса проведена при двух типах задающего воздействия на холостом ходу и под нагрузкой. Первый тип задает управляющее воздействие со ступенчатым изменением скорости, что позволяет оценить качество регулирования в предельных режимах работы.

Второй тип задающего воздействия формирует плавное перемещение рабочего органа пресса и позволяет оценить работу системы управления в режиме установившегося движения.

В экспериментах в качестве нагружающего устройства использовался гидроцилиндр с управляемым дросселем, настроенным на требуемое давление масла, создающее постоянное усилие в 18 кН.

Результаты экспериментальной оценки работы при различных значениях скорости, ускорения и перемещения исполнительного органа пресса представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальной оценки работы пресса

Задающее воздействие	Максимальное рассогласование по оси $ \Delta Z $ , мкм		Максимальная рассинхронизация $ \Delta Z_{ос} $ , мкм	
	холостой ход	под нагрузкой	холостой ход	под нагрузкой
1 тип	23,5	–	10,7	–
2 тип	20,4	23,4	7,9	15,7

Результаты коррелируют с результатами, приведенными в таблице 2.

Предельные значения рассогласования и рассинхронизации на несколько порядков меньше требований по взаимному расположению собираемых деталей.

**В четвертой главе** представлены физическая модель процесса гидропрессовой сборки, сформулированы требования к каналам регулирования, разработаны регулятор давления и система автоматического управления на основе нечеткой логики, приведены технологический комплекс для автоматизированной сборки, результаты экспериментального исследования автоматизированного процесса гидропрессовой сборки.

Система автоматического управления гидропрессовой сборкой (рисунок 6) включает в себя нечеткий регулятор давления, обладающий высоким быстродействием и обеспечивающий точность в динамическом режиме.

Регулятор давления включается на участке полусухого трения при достижении рабочего давления масла  $q_{раб}$  и отключается на участке торможения. Значение рабочего давления масла  $q_{раб}$  сравнивается с фактическим значением давления масла  $q$ , полученным с датчика давления после аналого-цифрового преобразования. Вычисленное рассогласование по давлению  $\Delta q = q_{раб} - q$ , его первая  $\Delta q'$  и вторая  $\Delta q''$  производные являются входными переменными для регулятора давления, формирующего управляющее воздействие  $dU_{v3}$ , уменьшающее отклонение давления рабочей жидкости от рабочего.

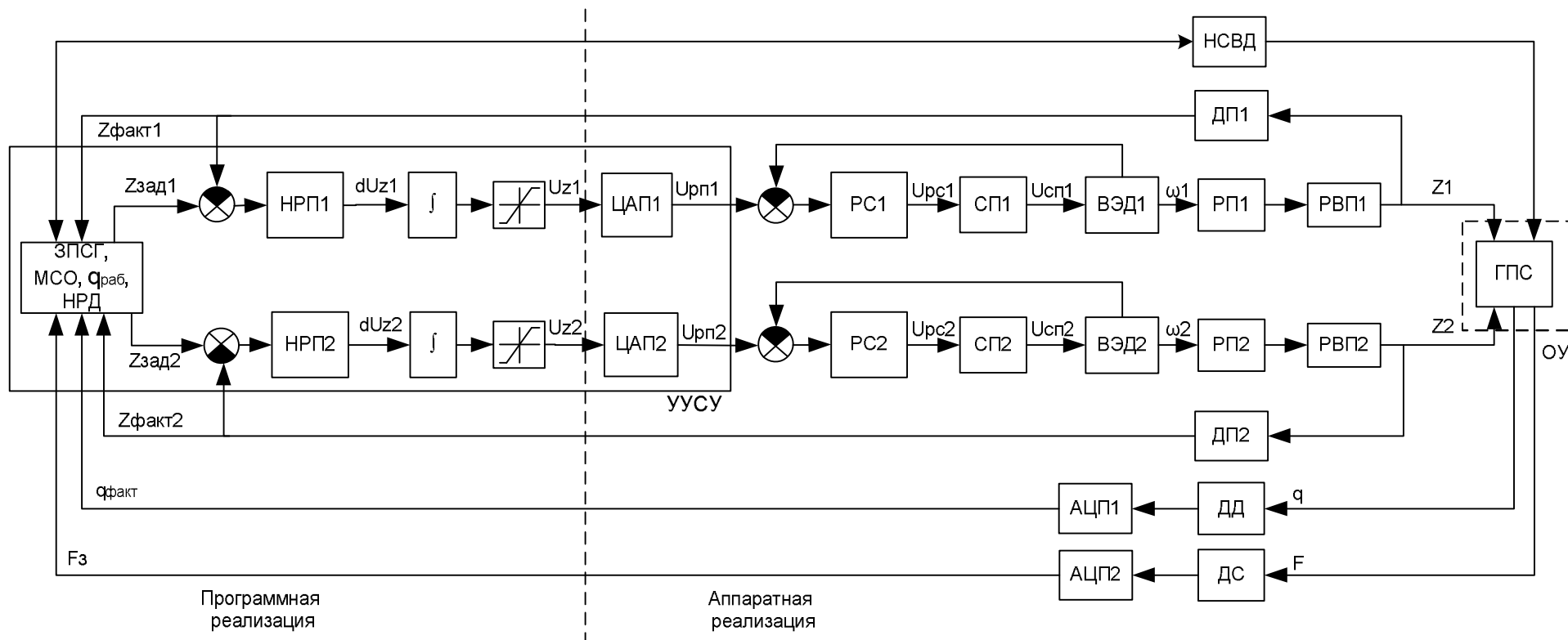


Рисунок 6 – Функциональная схема системы автоматического управления гидропрессовой сборкой

ЗПСГ[z] – задание положения и скорости при ГПС; МСО– модуль синхронизации осей; qраб - задание рабочего давления; НРД –регулятор давления на базе нечеткой логики; НРП1,2 –регуляторы положения осей 1,2 на основе нечеткой логики; ЦАП1,2 – цифро-аналоговые преобразователи; УУСУ - устройство управления среднего уровня; РС1,2 – регуляторы скорости, реализованные в силовых преобразователях СП1,2, ВЭД1,2 – вентильные электродвигатели; РП1,2 – ременные передачи; РВП1,2 - роликовинтовые передачи; АЦП1,2 – каналы аналого-цифрового преобразователя; ДП1,2 - датчики положения; ДД – датчик давления, ДС – датчик силы, НСВД – насосная станция высокого давления; ОУ – объект управления – процесс гидропрессовой сборки ГПС



Таким образом, выполняется регулирование давления масла  $q_{\text{раб}}$  в заданных пределах на участке регулирования (участок полусухого-жидкостного трения) путем изменения  $V_3$ , что обеспечивает требуемые режимы гидропрессовой сборки.

Конструкция опытных образцов представлена на рисунке 7.

Посадочные поверхности втулки получены электроэрозионной обработкой, вала – чистовым точением с последующим шлифованием.

Материал сопрягаемых деталей:

вал – сталь 40 ХН (HRC 40...45);

втулка – сталь 45 (230...260 НВ), титан ОТ-4.

Для проведения экспериментов изготовлено восемнадцать образцов, по три для каждой комбинации материалов и натягов.

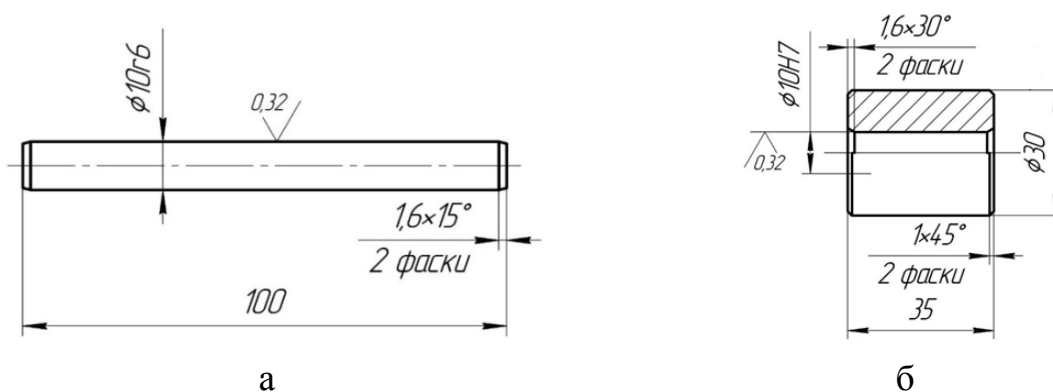


Рисунок 7 – Конструкция образцов деталей соединения с натягом:

а – вал; б – втулка

Начальное ускорение движения траверсы при запрессовке определялось исходя из технологических требований, предъявляемых к процессу сборки гидропрессовых соединений, а также из соображений обеспечения производительности сборочной операции и в зависимости от натяга варьировалось в пределах  $a_3 = 50 \dots 200 \text{ мм/с}^2$ .

Для большинства соединений с натягом, используемых в машиностроении, соотношения величины длины и диаметра посадки варьируются в пределах  $L = 0,5 \dots 3d$ , вследствие этого длина запрессовки в натурных экспериментах принималась  $L = 30 \text{ мм}$ .

Максимальная величина давления  $q_{\text{max}}$  исходя из условия невозникновения пластических деформаций составляет:

- для соединения «сталь-сталь»:

$$q \leq 0,58 \sigma_{\text{Тстали}} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right) = 0,58 * 450 * \left( 1 - \left( \frac{10}{30} \right)^2 \right) = 232 \text{ МПа} \quad (3)$$

Рабочая величина давления масла для соединения «сталь-сталь»

принималась равной 100 МПа исходя из условий обеспечения жидкостного трения и невозникновения пластических деформаций.

Изменения параметров процесса запрессовки в ходе эксперимента, представлены в виде диаграмм (рисунки 8, 9) (соединение «сталь-сталь»,  $\delta=21$  мкм,  $a_3=70$  мм/с<sup>2</sup>).

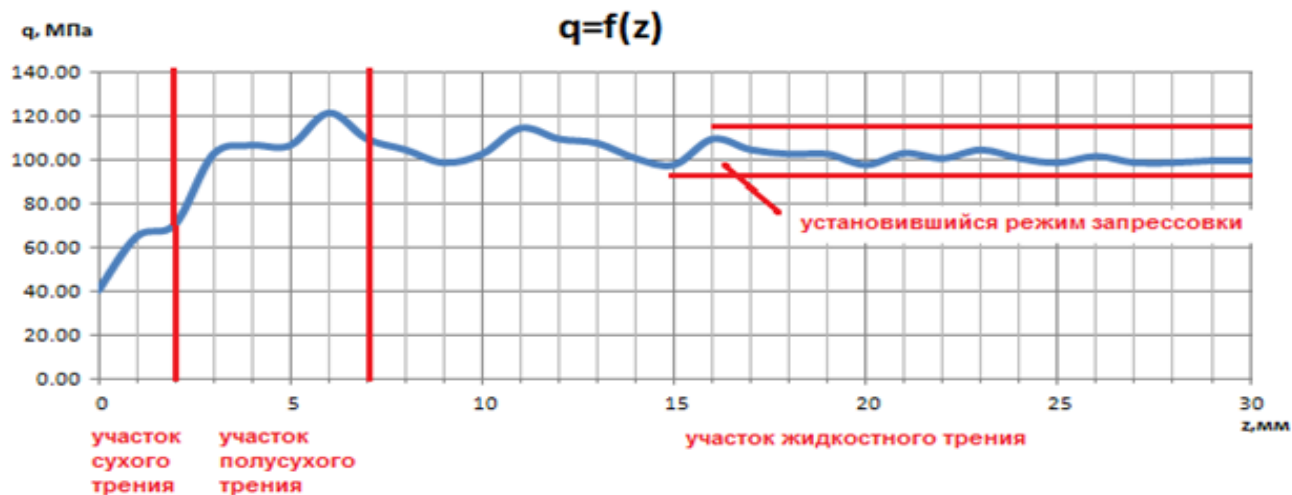


Рисунок 8 – График зависимости давления масла от длины запрессовки

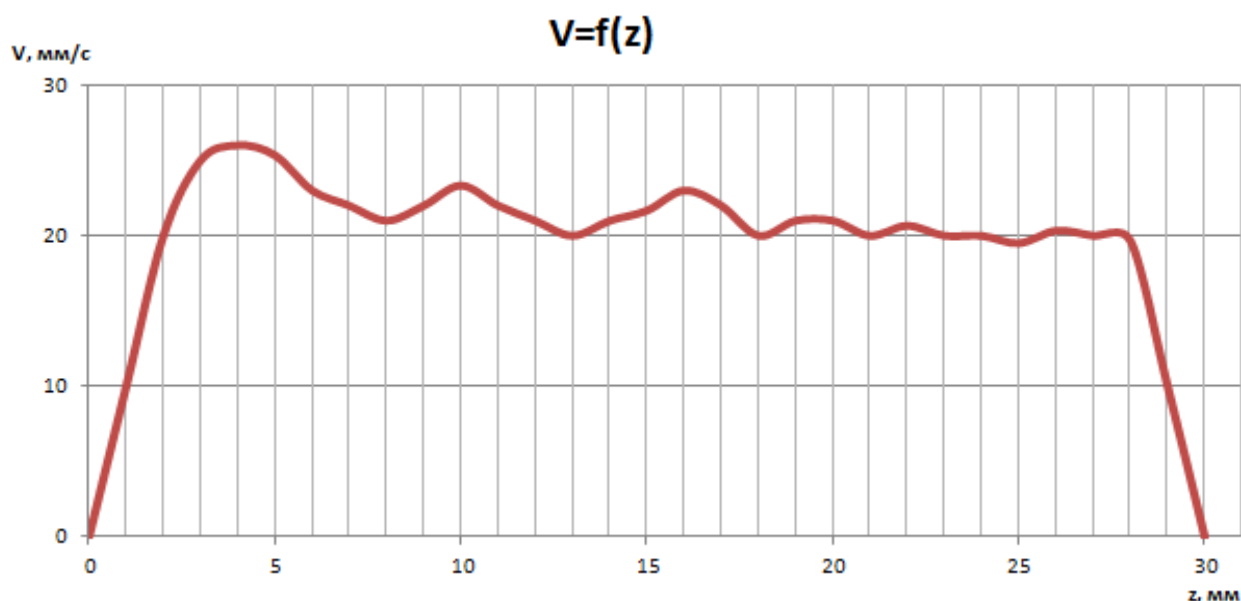


Рисунок 9 – График зависимости скорости запрессовки от длины запрессовки

Рост давления масла в начале процесса сборки обусловлен наличием участка сухого трения на заходной кромке втулки ввиду того, что требуемый для истечения масла зазор только начинает формироваться.

На участке полусухого трения давление масла также продолжает расти и достигении рабочего давления начинает работать регулятор давления, в дальнейшем изменение давления в зависит от скорости запрессовки. Регулятор на базе нечеткой логики обеспечивает поддержание давления масла близкого к рабочему путем уменьшения скорости либо повышение

путем увеличения скорости.

Выявлено, что режимы запрессовки для соединений с меньшими натягами изменялись более плавно, при этом на минимальном натяге при высоких ускорениях  $a_3$  (до  $200 \text{ мм/с}^2$ ) скорость запрессовки  $V_3$  возрастала до  $43 \text{ мм/с}$ .

После сборки соединения проводилось определение несущей способности соединения. Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения осевой силы и крутящего момента

№ образца	Образцы, вал-штулка	Натяг $\delta$ , мкм	$P_p$ , кН	$M_{кр}$ , Нм
1	сталь-сталь	6	2,89	15,70
2		15	7,46	34,93
3		21	10,35	51,46
4	сталь-титан	6	4,10	20,30
5		15	10,50	52,15
6		21	13,50	69,32

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают правильность и работоспособность предложенных математических моделей и алгоритмов управления мехатронным прессом при сборке в автоматическом режиме, а также качество собранных соединений по критерию несущей способности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. На основании требований, предъявляемых гидропрессовой сборкой, разработана конструкция мехатронного пресса с качающейся траверсой и двумя независимыми параллельными мехатронными модулями, что позволило обеспечить центрируемость собираемых деталей, сохранность масляной пленки и гарантированный режим жидкостного трения.

2. Разработана математическая модель мехатронного пресса, включающая закон движения рабочего органа пресса и обратные связи, учитывающие состояние технологического процесса гидропрессовой сборки, а именно: давление масла, силу и длину запрессовки.

3. Модифицированный способ синхронизации движения параллельных мехатронных приводов, заключающийся в ротации роли «ведущий-ведомый», обеспечил уменьшение рассинхронизации между осями в условиях внешних воздействий по сравнению со способами параллельного

управления в 1,5 раза, «ведущий-ведомый» – в 2,6 раза.

4. Разработан опытный образец мехатронного пресса с качающейся траверсой, и на его основе реализован технологический комплекс гидропрессовой сборки. Система автоматического управления мехатронным прессом на базе нечеткой логики позволила достичь требуемого качества процесса управления без дополнительной подстройки регуляторов при внешних возмущениях. Использование аппарата нечеткого управления при гидропрессовой сборке обеспечило управление технологическими режимами сборки, включающими: скорость запрессовки; давление масла, контроль силы и длины запрессовки без идентификации параметров сборочного процесса, а также гарантированное наличие жидкостного трения в условиях нелинейности процесса сборки.

5. Обоснована и подтверждена целесообразность применения управляющего воздействия на объект в виде изменения скорости запрессовки вала, обеспечивающего регулирование основного технологического параметра – давления масла – в требуемом диапазоне. Установлены параметры регулирования процесса гидропрессовой сборки соединений с натягом. Достигнутый для схемы с подводом масла с торца соединения уровень скорости запрессовки 43 мм/с более чем в 4 раза превышает максимальную скорость сборки в неавтоматическом режиме.

Дальнейшие перспективные направления исследования связаны с апробацией сборки с автоматизированным регулятором давления [2]. Планируется повышение интеллектуальности системы автоматического управления технологическим комплексом путем внедрения нейро-нечеткого контроллера. Указанные меры позволят обеспечить дальнейшее повышение производительности сборочного процесса без потери качества соединений.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Абрамов, А.И. Гидропрессовые соединения с деталями из титановых сплавов / А.И. Абрамов, И.В. Абрамов, А.В. Петров, А.В. Романов// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – №1. – С. 28–31.

2. Абрамов, А.И. Научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки соединения с натягом / А.И. Абрамов, И.В. Абрамов, А.В. Романов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – №1. – С. 16–18.

3. Абрамов, И.В. Автоматизированный регулятор избыточного объема масла для гидропрессовой сборки / И.В. Абрамов, А. И. Абрамов, Салама

Башар, А.В. Романов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Том 15, №2. – С 10 – 13.

4. Романов, А.В. Динамическая модель мехатронного модуля на базе вентильного электродвигателя и роliko-винтовой передачи / А.В. Романов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2016. – №1, – С. 22-25.

#### *Патенты*

5. Регулятор избыточного объема масла: пат. на полезную модель № 134677 Рос. Федерация. / Абрамов А.И., Абрамов И.В., Петров А.В., Романов А.В., Степанов А.В.; патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Абрамов А.И. – № 2013105434; заяв. 08.02.13; опубл. 20.11.13.

#### *В прочих изданиях*

6. Pavel Lekomtsev, Pavol Božek, Alexander Romanov, Andrey Abramov, Ivan Abramov, Yury Nikitin. Extracting load research of taper interference fit made of glass and ceramics parts using a servo press // Applied Mechanics and Materials Vol. 816 (2015) doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.816.461.

7. Pavol Božek, Andrey Abramov, Ivan Abramov, Yury Nikitin, Alexander Romanov. Synchronous control of parallel axes equipment // Applied Mechanics and Materials Vol. 816 (2015) doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.816.69.

8. Романов, А.В. Адаптивный сервопресс с синхронным управлением приводами / А.В. Романов, А.И. Абрамов, И.В. Абрамов // Выставка инноваций - 2014 (осенняя сессия) [Электронный ресурс]: электронное научное издание: сборник тезисов докладов XVIII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – Ижевск, 2014. – С. 50-52.

9. Романов, А.В. Информационно-измерительная система автоматической установки для гидропрессовой сборки соединений с натягом / А.В. Романов, А.И. Абрамов, И.В. Абрамов // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. [Электронный ресурс]: электронное научное издание: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. Ижевск, 23-25 апреля 2013. С. 389–392.

10. Романов, А.В. Моделирование системы управления мехатронным прессом в среде Simulink. / А.В. Романов, А.И. Абрамов, И.В. Абрамов // Сборник трудов Международной школы молодых ученых и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. – 2016. – С.25-28.

11. Степанов, А.Н. Управление давлением и расходом масла при гидропрессовой сборке с использованием регулятора грузового типа / А.Н. Степанов, А.В. Романов, А.И. Абрамов, Абрамов // Молодые ученые –

ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс]: электронное научное издание: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 23–25 апреля 2013 года. С. 398–402.