

В Диссертационный совет Д 212.065.06
на базе Ижевского государственного технического университета
имени М.Т. Калашникова
426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы - дом № 2, корпус №5
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Кульги Константина Станиславовича на диссертационную работу Романова Александра Васильевича «Автоматизация гидропрессовой сборки соединений с натягом с использованием мехатронного пресса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении).

1. Структура, объем и основное содержание диссертации

Диссертация состоит: из введения, четырех разделов (глав), заключения, списка использованных источников из 129 наименований. Работа выполнена на 178 страницах, включает 89 рисунков и 28 таблиц, 10 страниц приложений.

Во Введении обоснована актуальность темы, определены цель работы, объект и предмет исследования. Сформулированы научные результаты, выносимые на защиту, определены их научная новизна и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов работы. Дан краткий обзор структуры и объема диссертационной работы.

В первом разделе реализован системный анализ научных работ отечественных и зарубежных ученых в области теории сборки гидропрессовых соединений и применяемого пневматического, гидравлического, электромеханического прессового оборудования. Рассмотрены проблемы и определены требования к автоматизации гидропрессовой сборки, а также проанализированы применяемые конструкции мехатронного оборудования с параллельной кинематикой, включая методы (параллельный, «ведущий-ведомый», гибридный) и математические модели для управления синхронизации осей для одновременно перемещающихся узлов.

Для стабилизации качественных показателей соединений с натягом в диссертации обоснован выбор гидропрессового оборудования с электроприводом и определены требования к системе автоматического управления (САУ): наличие обратных связей по давлению масла (для исключения пластических деформаций в деталях соединения и технологической оснастке) и по положению (для контроля длины запрессовки); необходимость регулирования скорости движения (от 0,5 до 50 мм/сек) и контроля развиваемого усилия для обеспечения необходимого давления и режима жидкостного трения.

В заключение этого раздела автор формулирует выводы о том, что для автоматизации гидропрессовой сборки деталей необходимо реализовать комплекс теоретических и экспериментальных исследований для структурного

ИжГТУ
имени М.Т. Калашникова
27
№ 07/805
18

синтеза кинематической схемы и конструкции электромеханического мехатронного пресса с САУ.

На основе вышеуказанных выводов сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Второй раздел посвящен обоснованию выбора кинематической схемы мехатронного пресса, представлены математическая модель движения мехатронного пресса и результаты анализа способов синхронизации осей с параллельной кинематикой, приведена уточненная процедура синхронизации осей.

Учитывая значительные нагрузки и опыт конструирования прессового оборудования, автор выбрал двухстоечную компоновку несущей конструкции мехатронного пресса с параллельными электромеханическими приводными элементами и с использованием двух роликвинтовых передач (РВП).

Для определения закона движения рабочего органа мехатронного пресса автор разработал его математическую модель, сделав следующие допущения: значения жесткости винта и гайки постоянны; пренебрежение массой роликов при расчетах инерционных характеристик механизма и трением в соединениях траверсы с гайкой РВП/в зубчатой ременной передаче; трение в подшипниковых опорах и в РВП подчиняется закону Кулона-Амонтона; пренебрежение возможными погрешностями изготовления деталей.

Автор предложил модифицированный способ для синхронизации осей в механизме с параллельной кинематикой и алгоритм его реализации, 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. Проведенное компьютерное моделирование на холостом ходу и под нагрузкой позволило выявить, что модифицированный способ синхронизации обеспечивает уменьшение величины рассинхронизации между осями по сравнению с другими способами параллельного управления и управления «ведущий-ведомый».

Анализируя результаты компьютерного моделирования на основе предложенного модифицированного способа синхронизации, автор формулирует следующий вывод: разработанная математическая модель является идеализированной и не учитывает все реальные условия работы мехатронного пресса. В частности, вышеуказанные допущения и не учет влияния различных видов возмущающих воздействий, могут являться причиной различных значений коэффициентов трения в РВП осей, что в свою очередь, приведет к значительному возрастанию величины рассинхронизации осей. Автор предлагает решение этой проблемы с помощью создания аппаратно-программного обеспечения САУ мехатронным прессом на базе нечеткой логики с целью обеспечения требуемого качества соединений с натягом в недетерминированных условиях технологического процесса (ТП) гидропрессовой сборки (давление масла, сила и длина запрессовки) и синхронизации осей в механизме с параллельной кинематикой.

Третий раздел посвящен разработке САУ мехатронным прессом на основе нечеткой логики и системному анализу результатов вычислительного и натурального экспериментов.

Автор обосновал:

а) выбор треугольных функций принадлежности для реализации САУ мехатронным прессом;

б) диапазоны изменений следующих лингвистических переменных: «рассогласование по положению» и «скорость» (пять треугольных термов – перекрывающих друг друга множеств), «ускорение» (три треугольных терма), «управляющее воздействие» (семь треугольных термов). Для определения границ диапазона лингвистических переменных использовались экспериментальные данные, полученные автором при испытаниях мехатронного пресса с ПИД–регулятором положения при нагружении осевой силой от 0 до 18 кН;

в) содержания 75 продукционных условий в базе правил регулятора положения на основе нечеткого вывода. Сформулированная база правил регулятора положения описывает все возможные комбинации входных переменных и соответствующие им значения выходных переменных. При таком подходе исключается вариант неопределенности решения системы нечеткого вывода;

г) применение алгоритма Мамдани для преобразования значений входных переменных (соответствующих данному процессу управления) в выходные переменные с помощью продукционных условий (процедура нечеткого вывода).

Для исследования предложенной САУ мехатронным прессом с нечетким выводом (с учётом ранее обоснованных значений диапазонов входных переменных и управляющего выходного воздействия, базы правил регулятора положения) автор провел моделирование его работы с использованием программного обеспечения (ПО) системы MATLAB/Simulink. Первый вариант полученного переходного процесса носил колебательный характер (длительность процесса 390 мс – недостаточное быстродействие для процесса сборки; перерегулирование не превышает 11,9% – не удовлетворяет требованиям по точности позиционирования) и САУ мехатронного пресса не гарантировало требуемых показателей качества управления сборки деталей, включая возможность перебега вала относительно втулки. Автор реализовал коррекцию диапазонов величин лингвистических переменных (термов) и обеспечил допустимые показатели переходного процесса для гидропрессовой сборки: длительность процесса 170 мс; перерегулирование не превышает 1,7%; статическая составляющая ошибки регулирования не превышает 0,03%.

Автор оценил устойчивость САУ мехатронного пресса с регуляторами на основе нечеткой логики с помощью метода Ляпунова (фазовая траектория системы с регулятором положения на базе нечеткой логики имеет только одну особую точку в начале координат (устойчивый фокус) и стремится к этому положению).

В заключительной части этого раздела автор:

а) выполнил компьютерное моделирование мехатронного пресса на холостом ходу и под нагрузкой с учётом скорректированных термов при различных входных параметрах с целью определения максимальных величин рассогласования и рассинхронизации;

б) изготовил конструкцию и аппаратно-программное обеспечение (на основе решений фирмы Siemens) для управления работой мехатронного пресса с параллельной кинематикой, включая устройства управления верхнего (ПЭВМ) и среднего (программируемые логические контроллеры – ПЛК) уровней. Для реализации контроллера с нечеткой логикой автор использовал специальный язык программирования ПЛК FZL (Fuzzy Control Language);

в) провел экспериментальные исследования конструкции изготовленного мехатронного пресса на холостом ходу и под нагрузкой. Сравнительный анализ результатов максимальных значений рассогласования и рассинхронизации, полученных с помощью компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, выявил расхождение в допустимых пределах.

На основе полученных результатов экспериментальной апробации теоретических исследований САУ мехатронного пресса, автор формулирует вывод: максимальные значения рассогласования и рассинхронизации на несколько порядков меньше допустимых значений по взаимному расположению собираемых деталей.

В четвертом разделе представлены математическая модель процесса гидропрессовой сборки, сформулированы требования к каналам регулирования, разработаны регулятор давления и САУ на основе нечеткой логики, приведены технологический комплекс для автоматизированной сборки, результаты экспериментального исследования автоматизированного процесса гидропрессовой сборки.

Для реализации технологической схемы с подводом масла с торца соединения необходимо регулирование скорости запрессовки с целью обеспечения постоянного рабочего давления масла и режима жидкостного трения.

На основе предложенных математических моделей процесса жидкостного трения и контуров его регулирования (положения, скорости, давления, силы) для получения данных о протекании этого процесса, автор разработал САУ гидропрессовой сборки, которая включает в себя нечеткий регулятор давления, обладающий высоким быстродействием и обеспечивающий точность в динамическом режиме. 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. Регулятор давления включается на участке полусухого трения при достижении рабочего давления масла и отключается на участке торможения. Значение рабочего давления масла сравнивается с фактическим значением, полученным с датчика давления после аналого-цифрового преобразования. Вычисленное рассогласование по давлению масла является входной переменной для регулятора давления, формирующего управляющее воздействие для уменьшения отклонения величины давления масла от рабочего.

Регулирование давления масла в заданных пределах на участках полусухого и жидкостного трения предлагается осуществлять изменением скорости запрессовки с целью обеспечения режимов гидропрессовой сборки.

Автор обосновал применение регулятора на основе нечеткой логики для обеспечения поддержания давления масла близкого к рабочему путем уменьшения или увеличения скорости запрессовки. Выбор функций принадлежности, диапазона изменения лингвистических переменных, содержание производственных условий в базе правил регулятора на основе нечеткого вывода, алгоритма нечеткого вывода, разработка ПО ПЛК выполнены с помощью методики, приведенной в третьем разделе диссертации.

В заключительной части раздела автор провел экспериментальные исследования мехатронного пресса, работающего с помощью предложенной САУ, которые включали:

а) сборку деталей с учетом различных наборов исходных данных: материалы собираемых деталей (сталь, титан); режимы работы (давление масла, величина предварительного натяга, длина запрессовки);

б) получение диаграмм скорости запрессовки и давления масла от длины запрессовки.

в) экспериментальные испытания несущей способности полученных сборочных соединений «вал-втулка»;

г) сравнительную оценку несущей способности сборочных соединений «вал-втулка» (прочность соединения), полученных механической запрессовкой и гидропрессовой сборкой.

На основе полученных результатов исследований прочности сборочных соединений «вал-втулка», автор формулирует вывод о том, использование аппарата нечеткой логики в недетерминированных условиях ТП сборки позволило достичь требуемого качества соединений с натягом.

2. Актуальность темы диссертации

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 пресса) происходит в условиях жидкостного и граничного трения. Основным показателем качества соединения с натягом является его прочность. На прочность соединения ключевое значение оказывает обеспечение режима жидкостного трения при сборке, что гарантирует сохранность сопрягаемых поверхностей и прочность получаемого соединения. В механизированных прессах изменение параметров давления, расхода и вязкости рабочей жидкости, скорости выполнения операции сборки, технологической схемы и прессового оборудования, происходит до предельных значений и не регулируется, что отрицательно сказывается на стабильности процесса запрессовки, прочности собираемого соединения с натягом.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи: проектирование и изготовление конструкции мехатронного пресса, разработка аппаратно-программного обеспечения САУ с целью повышения качества протекание ТП автоматизированной гидропрессовой сборки и обеспечения прочности соединения «вал-втулка».

3. Научная новизна и достоверность результатов и выводов диссертации

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: предложена и апробирована в производственных условиях САУ качеством ТП гидропрессовой сборки по критерию прочности соединения «вал-втулка» с помощью аппарата нечеткой логики, отличающаяся математическими моделями движения рабочего органа мехатронного пресса с учётом недетерминированных условий ТП гидропрессовой сборки (давление масла, сила и длина запрессовки) и синхронизацией осей в механизме с параллельной кинематикой.

Вынесенные на защиту пункты диссертации подтверждены результатами вычислительных и производственных экспериментов.

Все представленные автором результаты характеризуются научной новизной и получены впервые.

Научно-технические результаты диссертационной работы приняты к использованию в производственном процессе на предприятии АО «Концерн «Калашников» (акт приведен в Приложении А диссертации), а также используются на кафедре «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова для обучения студентов по направлениям 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

4. Значимость работы для науки и практики

Разработаны и практически апробированы результаты проектирования конструкции мехатронного пресса с механизмом параллельной кинематики и аппаратно-программного комплекса САУ, позволяющие реализовать управление качеством ТП автоматизированной гидропрессовой сборки по критерию прочности соединения «вал-втулка».

Считаю, что теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы Романова А.В., могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, использующих оборудование для гидропрессовой сборки.

5. Замечания по содержанию диссертации

По обсуждаемой работе можно высказать следующие замечания:

1) Раздел 1.2.2. Автор отмечает, что для автоматизации сборки соединений с натягом необходимо обеспечить относительное центрирование сопрягаемых деталей. Ошибки, допущенные при запрессовке, нередко являются причиной образования задиров на участках сухого трения. В то же время, в диссертации отсутствует как постановка, так и решение задачи для обеспе-

чения центрирования осей по третьей координате для сборки соединений с натягом;

2) Содержание первого раздела диссертации не соответствует классической структуре: раздел 1.1 – актуальность научной проблемы; раздел 1.2 – системный анализ научных исследований в предметной области; раздел 1.3 – обоснование цели и задач исследований. В первом разделе диссертации отсутствует обязательный раздел, связанный подробным обоснованием цели и перечень задач научных исследований для достижения этой цели (есть только выводы по первому разделу);

3) Раздел 2.1, страница 30. Автор отмечает, что в результате проведенного в первом разделе анализа литературных источников не установлено наличия мехатронных прессов с независимыми управляемыми осями. Необходимо отметить, что такой вывод отсутствует в первом разделе диссертации;

4) Раздел 2.1, страница 30. Отмечается, что самоцентрирование вала относительно сопрягаемого отверстия втулки обеспечивается путем покачивания траверсы. Однако, из текста диссертации и рисунка 2.1 не ясно, как обеспечивается самоцентрирование вала относительно сопрягаемого отверстия по третьей координате. На рисунке 2.1 не обозначена система координат;

5) Раздел 2.2, рисунок 2.2. Автор отмечает, что для повышения точности мехатронного модуля линейного движения необходимо учитывать жесткости, потери на комбинированное трение (скольжения и качения), геометрические и массо-инерционные параметры. Расчетная схема на рисунке 2.2, не учитывает: закрепление конструкции; массовые моменты инерции несущей конструкции двух стоек и траверсы пресса; точное геометрическое расположение и вид подвижных стыков (опор); механические свойства материалов и ряд других статических и кинематических граничных условий. Также не понятно, какая жесткость подвижных стыков рассматривается в работе (радиальная или осевая). Для проведения статических и динамических исследований предложенной компоновки пресса эффективнее было бы использовать метод конечных элементов с проверкой сходимости результатов;

6) Раздел 2.2, страница 40. Соискатель подробно описывает расчет жесткости РВП C_{13} по формуле (2.36) из публикации [69]. А в диссертации автор определяет жесткость C_{13} из каталога [14], а не с помощью формулы (2.36);

7) Раздел 2.3. 7.1) В формуле (2.41) и далее в тексте диссертации не приведена расшифровка обозначения переменной ΔS ; 7.2) На странице 47 не указан литературный источник, из которого получен диапазон варьирования значения теоретического суммарного люфта ΔS_{MAX} (от 18 до 100 мкм) в подвижном соединении траверсы с гайкой РВП; 7.3) На странице 47 автор утверждает, что безопасная эксплуатация пресса возможна при условии, если величина рассинхронизации не превышает значения гарантированного среднего зазора $\Delta S_{\text{MAX}} = S_1 + S_2 = 23 + 39 = 62$ мкм, в противном случае при перекосе траверсы возможен критический изгиб винта и разрушение РВП. Как следует из формулы (2.41), $\Delta S_{\text{макс}}$ – это не средний зазор. Величина среднего зазора S

рассчитывается по другой формуле и имеет другое значение: $S = (S_{\text{MAX}} + S_{\text{MIN}}) / 2 = 29,5$ мкм;

8) Раздел 3.1.3, страница 68. Допущена ошибка в описании терма выходной нечеткой переменной: «положительный малый»;

9) Раздел 3.1.4. 9.1) На странице 72 отсутствует обоснование продукционного правила для регулятора на базе нечеткой логики: «При этом используем предположение о том, что большему рассогласованию по положению должно соответствовать большее управляющее воздействие, в зависимости от его величины сформулированы лингвистические правила». 9.2) На странице 75 для описания b_i автор применяет термин степень принадлежности, а далее по тексту диссертации – функция принадлежности термов лингвистических переменных; 9.3) На этапах агрегирования и активации в алгоритме нечеткого вывода Мамдани, выявлено не соответствие сформулированных условий высказываний в графиках, приведенных на рисунках 3.8 – 3.9; 9.4) На рисунке 3.9 показан график терма «положительный малый» для определения значения нечеткой выходной переменной приращение управляющего воздействия dU_z (этап активации в алгоритме нечеткого вывода Мамдани), а в комментариях к этому рисунку, автор описывает терм как «положительное среднее»;

10) Раздел 3.2. Не хватает восьмого графика «Рассогласование по положению под нагрузкой» для комплектации результатов компьютерного моделирования мехатронного пресса, приведенных на рисунках 3.20 – 3.26;

11) Раздел 3.3. Обратные связи по давлению не показаны, о них только говорится при рассмотрении программного обеспечения САУ мехатронным прессом на рисунке 3.28;

12) Разделы 3.2., 3.4 и Выводы к главе 3. Для оценки результатов компьютерного моделирования работы мехатронного пресса и проверки сформулированных выводов в разделах 3.4 и «Выводы к главе 3», желательно добавить в таблицы 3.5 – 3.6, 3.10 допустимые значения максимального рассогласования (это значение отсутствует в диссертации) и рассинхронизации (это значение найдено только во втором разделе диссертации на странице 47: $\Delta S_{\text{макс}} = 62$ мкм);

13) Раздел 4.1, страница 109. В описании физической модели гидропрессовой сборки (рисунок 4.1), автор указывает на уменьшение диаметров втулки и вала. А далее в тексте диссертации автор утверждает следующее: «...величина расширения втулки, как и величина сжатия вала»;

14) Раздел 4.6, страница 137. Автор утверждает, что основным показателем качества получаемого соединения является давление масла q , на изменение величины которого основное влияние оказывают скорость сборки и величина натяга. В тоже время, во втором и третьем разделах диссертации, автор оценивал влияние на качество гидропрессовой сборки параметров рассогласования и разности координат в механизме перемещения траверсы по оси Z (модуль для создания силы запрессовки). В диссертации нет обоснования, почему первоначально не рассмотрена единая математическая модель САУ ТП гидропрессовой сборки деталей и результаты её компьютерного мо-

делирования. Тем более, что экспериментальные исследования мехатронного пресса, осуществлялись с учетом всех входных и выходных параметров ТП гидропрессовой сборки деталей;

15) Раздел Выводы по главе 4. 15.1) В первом выводе автор предлагает применить интеллектуальные системы управления на основе нейронных сетей, хотя в тексте диссертации об этом нет никаких упоминаний; 15.2) Во втором выводе автор приводит сравнительную оценку предложенного метода сборки с другими методами: дифференциальный метод создания давления и с использованием регулятора масла. В этом разделе не рассматривались вышеуказанные методы сборки и не были получены результаты, позволяющие сформулировать такой вывод;

16) Раздел Заключение. Не все выводы из этого раздела диссертации имеют ассоциативную связь с ранее сформулированными задачами.

6. Форма изложения и оформление материалов диссертации

Работа не свободна от недостатков оформления текста диссертации, ряд математических формул и обозначения переменных, выходные данные ряда публикаций записаны без использования соответствующих правил для печатных изданий. Несколько рисунков размещаются в тексте раньше ссылок на них, присутствуют неправильные ссылки на рисунки, выявлены нарушения регулярной нумерации рисунков, имеют место орфографические, пунктуационные и стилистические ошибки (включая разделы с выводами и общим заключением).

7. Заключение

Диссертационная работа Романова А.В., является самостоятельной завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему.

Диссертационная работа содержит **решение научной задачи**, связанной с повышением производительности и качества сборки деталей с натягом на основе САУ ТП гидропрессовой сборки по критерию прочности соединения «вал-штулка». Полученные результаты отличаются от известных новыми математическими моделями движения рабочего органа мехатронного пресса с учетом недетерминированных условий ТП гидропрессовой сборки (давление масла, сила и длина запрессовки) и синхронизации осей в механизме с параллельной кинематикой. Необходимо отметить, что автор апробировал полученные научные результаты в виде изготовленной конструкции мехатронного гидропресса с параллельной кинематикой и разработанного аппаратно-программного обеспечения САУ.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Степень апробации основных положений работы путем опубликования в научно-технической печати (четыре статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ; две статьи в изданиях, цитируемых в базе данных Scopus), выступлений на научно-технических конференциях – достаточна.

Высказанные выше замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации.

Считаю, что работа Романова А.В. является законченным исследованием, её результаты имеют научную новизну и практическое значение, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, указанным в Положении ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней. Соискатель Романов Александр Васильевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении).

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Автоматизации
технологических процессов» ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный авиацион-
ный технический университет (УГАТУ)».
Почтовый адрес: Российская Федерация,
Республика Башкортостан, п/и 450008,
г. Уфа, ул. К. Маркса, дом №12.
Рабочий телефон: 8-(347)-2730526.
Электронная почта: admin@stalkerplm.com
stalker_pro@mail.ru

Кульга
Константин Станиславович

Подпись *Кульга К.С.*
Удостоверяю « 16 » 02 20 16
Начальник отдела документационного обеспечения
и архива *Анна Гильванова*

