

На правах рукописи



**Чжо Аунг Хтет**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ  
ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.13.06

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами  
(промышленность)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена на кафедре «ЭПАПУ» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: **Соловьев Вячеслав Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Электропривод и автоматизация  
промышленных установок» ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет»

Официальные оппоненты: **Кравченко Олег Александрович**  
доктор технических наук, доцент, проректор по  
научной работе и инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский  
государственный технический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова». (г. Новочеркасск)

**Кладиев Сергей Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
отделения электроэнергетики и электротехники  
«инженерная школа энергетики» ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет». (г. Томск)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный  
университет». (г. Владивосток)

Защита состоится «24» апреля 2020 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 999.086.03 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-  
Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-  
Амуре, проспект Ленина, д. 27, ауд.201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте  
[https://sovnet.knastu.ru/diss\\_defense/show/131](https://sovnet.knastu.ru/diss_defense/show/131).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью  
учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета  
Д 999.086.03. **E-mail:** etf@knastu.ru

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 999.086.03  
кандидат технических наук, доцент

А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Специфической особенностью ряда предприятий машиностроительного производства является применение крупно-габаритных изделий двойной кривизны. К качеству этих изделий предъявляются высокие требования, поскольку они играют роль высоконагруженных несущих элементов.

В настоящее время такие изделия, как правило, изготавливаются из массивных поковок путем фрезерования. Такой подход изготовления характеризуется высокой степенью материалоемкости, существенными временными затратами, значительной трудоемкостью, а в результате – большей стоимостью конечного продукта.

Известна и другая технология, которая предполагает предварительное задание определенной кривизны плоским панелям. При этом предварительное формование может осуществляться различными способами: обтяжкой, гибкой, пластическим деформированием, прокаткой и штамповкой. Наиболее перспективной для этих целей следует считать технологию высокотемпературной многоточечной формовки, при которой на заготовку при определенной температуре воздействует массив независимо перемещающихся стержней, обеспечивающих деформацию заготовки по заданным параметрам. Однако реализация данной технологии осуществляется только в рамках экспериментально - опытных установок. Сведения о системах управления процессом высокотемпературной многоточечной формовки носят отрывочный характер. Отсутствуют рекомендации по разработке и проектированию таких систем управления.

**Степень разработанности темы** Значительный вклад в изучение проблемы высокотемпературной многоточечной формовки и создания для ее реализации специализированных установок и систем управления ими внесли такие ученые и специалисты Авдеев В.М., Аксенов Л.Б., Алиев И.С., Братухин А.Г., Гусев Г.А., Любашевская И.В., Рублевский Л.Л., Миодушевский П. В., Богоявленский К.Н. и др.

Развитию теории и практики создания технических средств для высокотемпературной многоточечной формовки уделяли внимание Раевская Г.А., Соснин О.В., Клопотов И.Д., Горев Б.В., Сироткин О.С., Georgy T. Pinson, Мациуси М.

Большинство работ в данной области посвящены вопросам технической реализации установок многоточечной формовки плоских панелей, а вопросы, связанные с особенностями построения систем управления многодвигательной системой приводов линейных перемещений, остались недостаточно освещенными. Кроме того, не исследовалось влияние объекта управления, его свойств на характеристики системы управления.

Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования, посвященного изучению влияния свойств и параметров формуемого материала на характеристики системы управления процессом

высокотемпературной многоточечной формовки, что и определяет актуальность темы диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке перспективных технических решений по созданию интеллектуальной системы управления процессом высокотемпературной многоточечной формовки.

**Объектом исследования** является технологический процесс высокотемпературного формообразования крупногабаритных плит путем многоточечного нагружения.

**Предмет исследования.** Система управления технологическим процессом высокотемпературного формообразования крупногабаритных плит путем многоточечного нагружения.

**Задачи исследования:**

1 Разработка математического описания процесса формования как объекта силового воздействия электромеханического модуля.

2 Разработка математического описания многоточечной системы управления процессом формообразования профильных изделий.

3 Исследование влияния взаимодействия электромеханических модулей друг на друга через общую нагрузку.

4 Разработка интеллектуальной взаимосвязанной системы управления процессом высокотемпературного формообразования крупногабаритных плит.

5 Экспериментальное исследование для подтверждения теоретических положений, полученных в работе.

**Научная новизна:**

1 Разработана математическая модель многоточечной взаимосвязанной системы управления формованием профильных деталей, учитывающая свойство формующего материала.

2 Результаты исследования взаимовлияния электромеханических модулей через общий объект управления.

3 Разработаны нечеткие алгоритмы управления многоточечной взаимосвязанной системы формования профильных деталей.

**Практическая значимость:**

1 Результаты исследования могут быть использованы при разработке и проектировании многоточечной формообразующей установки.

2 Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского на Амуре государственного университета при изучении курсов «Автоматизация технологических процессов и производств», «Интеллектуальные системы управления».

**Теоретическая значимость диссертации.** Состоит в расширении теоретических исследований построения взаимосвязанных систем управления процессом многоточечного формования профильных изделий с учетом внутренних свойств материала.

**Методы исследования.** В работе были использованы экспериментальные и теоретические методы исследований. Используются методы теории

упругости и пластичности, теории управления, теории электропривода, методы и подходы, базирующиеся на использовании аппарата нечеткой логики. Для оценки взаимосвязанности между локальными приводами использован программный продукт Femap. Для моделирования системы многоточечного взаимосвязанного формообразования профильных изделий использован программный продукт MATLAB.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 Результаты исследования влияния взаимодействия электромеханических модулей друг на друга через общую нагрузку ( п.1 паспорта специальности. 05.13.06).

2 Интеллектуальная многоточечная взаимосвязанная система управления процессом высокотемпературного формообразования крупногабаритных плит ( п.15 паспорта специальности. 05.13.06).

3 Результаты экспериментальных исследований для подтверждения теоретических положений полученных в работе ( п.1 паспорта специальности. 05.13.06).

**Достоверность научных результатов.** Приводимые результаты и выводы подтверждаются значительным объемом экспериментальных данных и их соответствием теории и практики процессов многоточечного формообразования, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

1 Отчетная конференция аспирантов Республики Союза Мьянма (Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГУ", 2 ноября 2016 г.)

2 47-ая научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017г.)

3 Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» (Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 19 октября 2017г.)

4 Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г.)

5 Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Электроприводов на транспорте и в промышленности» ( Хаборобск, 20-21 сентября 2018).

6 Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con 2018» ( Комсомольск-на-Амуре, 2-4 октября 2018г).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, 1 статья включена в базы цитирования Scopus.

**Личный вклад соискателя состоит в следующих работах:**

1 В разработке математической модели многоточечной взаимосвязанной системы управления формованием профильных деталей, учитывающей свойства формуемого материала.

2 В проведении исследования по оценке взаимовлияния локальных систем управления электроприводами линейных перемещений через общую нагрузку.

3 В разработке нечетких алгоритмов управления и синтезе параметров регуляторов многоточечной взаимосвязанной системы управления формованием профильных деталей.

**Соответствие паспорту специальности.** Исследования, выполненные в диссертационной работе, соответствуют пунктам 1, 4, 15 паспорта специальности. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»:

Пункт 1. Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки.

Пункт 4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация.

Пункт 15. Теоретические основы, методы, алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, основных выводов, списка литературы (63 наименования) и приложения. Материал изложен на 104 страницах, содержит 53 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы общая цель и задачи исследовательской работы, научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** представлен анализ реализации силовой части системы формирования профильных изделий, представлен анализ систем управления формованием профильных изделий, рассмотрены особенности математического аппарата описания процесса формообразования. На основании проведенного анализа было выявлено, что наиболее перспективным вариантом реализации многоточечного устройства формования изделий двойной кривизны является устройство на базе силовых электромеханических модулей. Такой подход расширяет функциональные возможности систем управления устройством и позволяет контролировать параметры процесса формообразования в процессе изготовления заготовки. Однако построение систем управления многодвигательными электромеханическими устройствами, при большом количестве одновременно управляемых двигателей ( $n \geq 400$ ) не имеет

законченного решения. Имеются только сведения о лабораторных испытаниях. Кроме того, отсутствует математическое описание процесса формования как объекта силового воздействия электромеханического модуля. Не выявлены связи между параметрами формообразования и выходными параметрами электромеханического модуля (линейное перемещение, скорость перемещения), отсутствуют рекомендации по построению систем управления одномерным электромеханическим модулем, не исследовано влияние взаимодействия электромеханических модулей друг на друга через общую нагрузку.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели объекта системы управления процессом многоточечного формованием профильных изделий, уточнению структурных связей многоточечной системы управления формованием профильных изделий, оценке степени взаимосвязанности между локальными системами электроприводов.

Процесс многоточечного формования близок к процессу гибки материала, поэтому в дальнейшем при разработке математического описания процесса формования за основу принята гибка листового материала. Базовым звеном, обеспечивающим придание заготовке желаемой кривизны, является комбинация взаимодействия трех стержней. Наличие общего объекта силового воздействия вынуждает рассматривать систему управления электромеханическими модулями как взаимосвязанную. Статику процесса формования схематично можно представить в виде, показанном на рисунке 1.

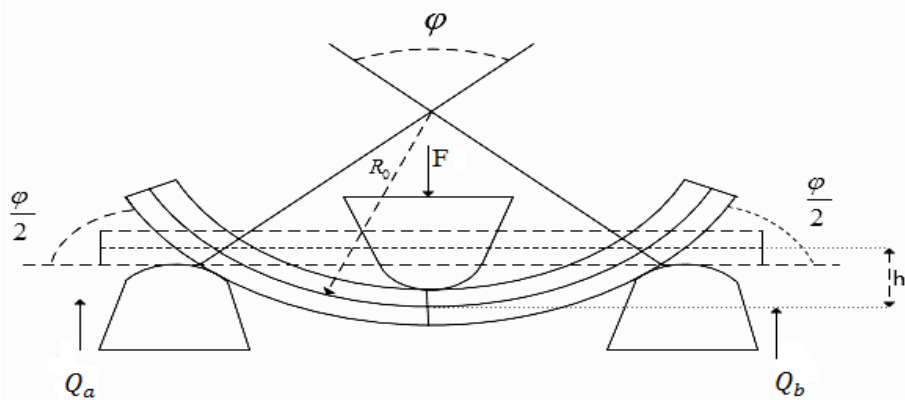


Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая процесс изгиба

Обозначениям, приведенным на рисунке 1 соответствуют:  $R_0$  – условный центральный радиус;  $\varphi$  – центральный угол изгиба;  $h$  – величина прогиба (линейное перемещение формирующих стержней);  $F$  – усилие, воздействующее на заготовку;  $Q_a$ ,  $Q_b$  – противодействующие усилия на оппозитно расположенных стержнях.

При перемещении центрального стержня на величину  $\Delta h$  со стороны заготовки на него будет воздействовать сила сопротивления, которая будет зависеть как от размеров заготовки, так и от свойств материала заготовки.

Толщина слоя, подвергающаяся немоной деформации незначительна, а радиус изгиба больше трехкратного значения толщины заготовки. Угол изгиба  $\varphi$  в процессе формования заготовки изменяется от нулевой величины до некоторого конечного значения, определяемого линейным перемещением. В приближении  $\operatorname{tg} \varphi/2$  можно выразить через параметры узла формования  $\operatorname{tg} \varphi/2 \approx 2\Delta h/l$ . Тогда математическое описание объекта управления системы процесса формования примет вид:

$$\Delta F = \frac{\sigma_s \cdot \frac{B \cdot s^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \cdot \frac{B \cdot s^2}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{\Delta h}{4} \cdot \frac{\frac{2 \cdot \Delta h}{l} - \mu}{1 + \mu \cdot \frac{2 \cdot \Delta h}{l}}}. \quad (1)$$

где  $s$  – толщина заготовки, м;  $B$  – размер заготовки, подвергаемый изгибу и измеряемый в перпендикулярном отношении к оси расположения оппозитно расположенных стержней, м;  $R_0$  – центральный радиус изгиба, м;  $l$  – расстояние между осями оппозитно расположенных стержней, м;  $\sigma_s$  – модуль пластичности материала;  $\Pi$  – модуль упрочнения материала;  $\mu$  – коэффициент трения между стержнем и заготовкой.

Как известно, процесс деформации является нестационарным процессом, в силу того, что параметры процесса (значения сил, моментов, радиуса кривизны) изменяются во времени. Получить аналитическую зависимость между действующими усилиями и линейными перемещениями стержней затруднительно. В первом приближении будем считать, что радиус гибки превышает три толщины заготовки, а это позволяет считать процесс пластического изгиба исходя из схемы линейного напряженного состояния металла. В такой постановке можно зависимость между поперечным усилием и скоростью линейного перемещения стержня выразить в виде передаточной функции инерционного звена первого порядка:

$$W_T(p) = \frac{\Delta P(p)}{\Delta V(p)} = \frac{K_T}{T_T p + 1}, \quad (2)$$

где  $K_T = T/\Delta V_{CT}$  – коэффициент изгиба,  $T$  – натяжение металла обусловленное разностью скоростей перемещения стержней, разность скоростей перемещения формирующих стержней;  $T_T = \frac{lK_T}{\sigma_s Q}$ ,  $l$  – расстояние между формирующими стержнями,  $\sigma_s$  – модуль пластичности материала,  $Q$  – сечение изгибаемого материала. Опираясь на закон Гука можно записать:

$$T_T = \Delta l \frac{\sigma_s Q}{T} \frac{K_T}{\sigma_s Q} = \Delta l \frac{K_T}{T} = \frac{\Delta l}{\Delta V_{CT}}. \quad (3)$$

Опираясь на известные технические решения, в которых была обоснована целесообразность использования в качестве электропривода линейного перемещения стержней – электропривода переменного тока на базе синхронного серводвигателя, силовая часть которого может быть представлена в виде понижающего редуктора и преобразователя вращательного движения



двигателя в поступательное с помощью типовой шарико-винтовой пары. В такой постановке, при условии что система регулирования индивидуального привода перемещения стержня содержит регуляторы координат привода (тока, скорости и положения), структурная схема одного привода линейного перемещения с учетом объекта управления будет представлять собой вид, показанный на рисунке 2.

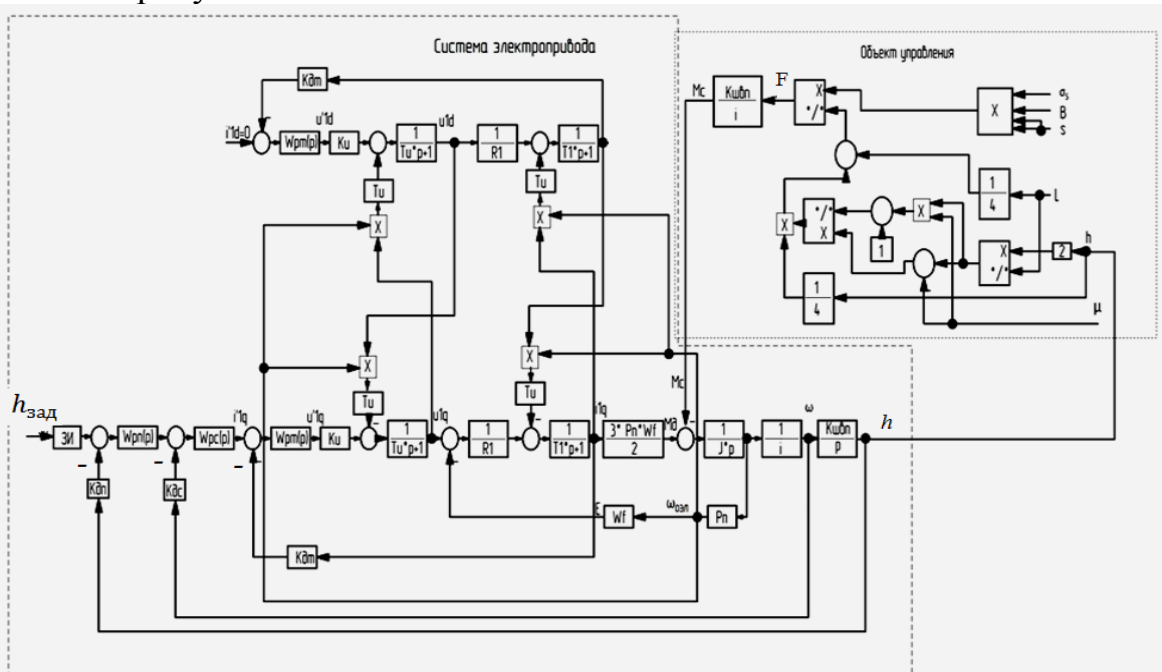


Рисунок 2 – Структурная модель позиционного электропривода формирующего стержня

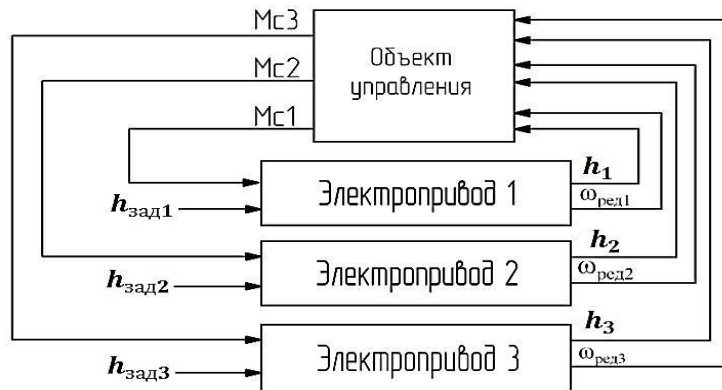


Рисунок 3 – Функциональная схема модели узла трехточечного формования

Для повышения точности и качества формируемых изделий, а также для расширения номенклатуры этих изделий реальная установка формования профильных изделий содержит более 180 формирующих стержней, каждый из которых снабжен индивидуальным сервоприводом. Все электропривода взаимодействуют между собой посредством общего объекта управления. Для принятого ранее в качестве базового узла формования трехточечной модели гибки листового материала с условием, что и формирующее поперечное усилие и противодействующие опорные усилия являются управляемыми и создаются с

помощью оппозитно перемещаемых стержней функциональную схему системы управления таким узлом формования можно представить в виде, приведенном на рисунке 3.

При разработке имитационной модели многоточечной взаимосвязанной системы формования необходимо предварительно исследовать степень взаимосвязанности между локальными системами электроприводов и выбрать приемлемые критерии и методы оценки взаимосвязанности.

С помощью конечно-элементного анализа (программа Femap) исследованы распределения усилий стержней многосвязанной системы формования листового материала. Так, например, при моделировании матрицы управляемых электромеханических модулей размером 5x5, при наличии перемещения центрального рабочего стержня, на ближайшие оппозитные стержни действуют усилия, составляющие 0.349 от усилия, воздействующего на центральный рабочий стержень. На рисунке 4 представлены результаты моделирования матрицы управляемых электромеханических модулей размером 7x7. В данном случае усилия приходящиеся на ближайшие оппозитные стержни, составляют 0.351 от усилия, воздействующего на центральный рабочий стержень.

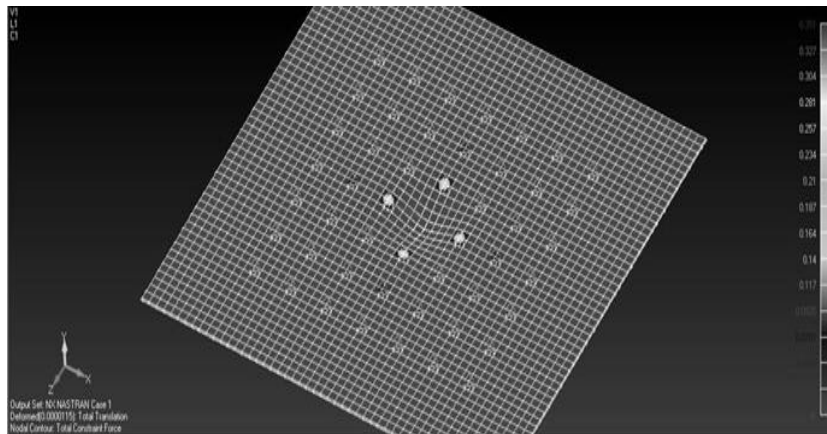


Рисунок 4 – Результаты моделирования матрицы размещения стержней локальных электроприводов размером 7x7

Дальнейшее исследование показало, что с увеличением размерности расстояния между стержнями матрицы размещений стержней локальных электроприводов, усилия на ближайшие оппозитные стержни незначительно уменьшается. Дальнейшее увеличение размерности матрицы выше 11x11 не приводит к существенным изменениям усилий.

Это позволило при дальнейшем исследовании многоточечной взаимосвязанной системы формования листового материала опираться на матрицу размещения стержней локальных электроприводов размером 5x5.

Ниже на рисунке 5 приведены результаты моделирования распределения усилий в матрице размещения стержней локальных электроприводов размером 5x5 многосвязанной системы формования листового материала при наличии перемещения центрального формующего стержня. Наибольшую нагрузку испытывают стержни, расположенные по вертикали и горизонтали от

основного модуля при работе стержня 33, наименьшую же – стержни по диагоналям. Остальные стержни занимают промежуточную позицию.

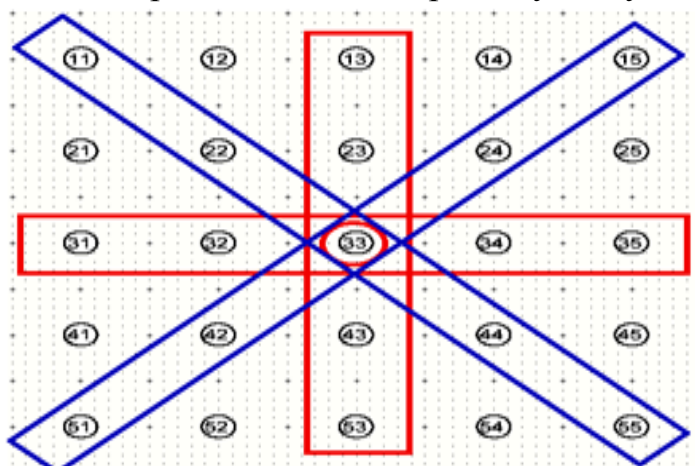
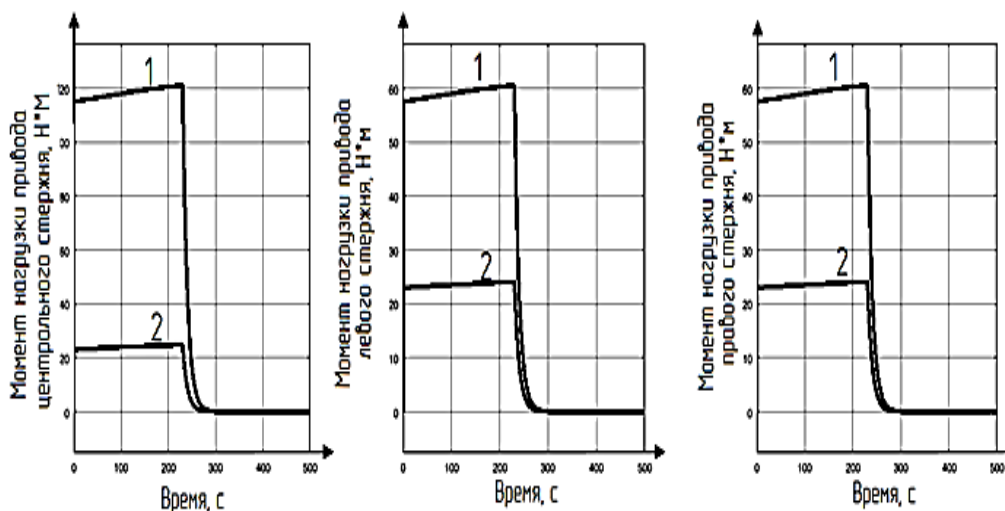


Рисунок 5 – Распределение усилий в матрице размещения стержней локальных электроприводов размером 5x5

Кроме того, в результате исследования был выявлен факт наличия взаимовлияний между стержнями при их одновременном перемещении в процессе формования. Это объясняется тем, что в процессе формования на стержень действует не только усилие формования, но и противодействующие усилия от работы соседних стержней, что, несомненно, приводит к увеличению нагрузки, как на сам стержень, так и на его привод.



1 – момент нагрузки привода при одновременном перемещении стержней

2 – момент нагрузки привода при раздельном перемещении стержней

Рисунок 6 – Результаты моделирования взаимосвязанной системы позиционных электроприводов

Для оценки глубины взаимосвязи многоточечной системы формования профильных изделий листового материала дальнейшее исследование проводилось на полученной имитационной модели базового трехточечного узла формования листового материала в среде Matlab. При этом, контуры тока, скорости и положения локальных электроприводов настроены на основе

классического подхода управления. На рисунке 6. приведены результаты моделирования взаимосвязанной трехточечной системы позиционных электроприводов представлены для момента на валу каждого из электроприводов.

Из представленных результатов можно сделать заключение, что момент нагрузки электропривода каждого стержня непостоянен во времени и зависит от величины перемещения стержня, а также от его скорости. При этом имеет место наличие взаимовлияния приводов стержней при их одновременной работе, что выражается в увеличении момента нагрузки на привода всех стержней. Поэтому при разработке системы регулирования электроприводов стержневой установки необходимо применять корректирующие узлы, исключающие взаимовлияния электроприводов друг на друга при их одновременной работе с целью повышения качества изготавливаемых деталей. Также компенсация взаимовлияний позволит снизить нагрузку на элементы привода стержней, что повышает срок службы установки.

**В 3 главе** рассмотрены вопросы создания математической модели интеллектуальной многоточечной взаимосвязанной системы управления процессом формования профильных изделий, разработки базы правил регуляторов этой системы управления, моделирования нечеткой взаимосвязанной системы управления.

Исследования в области формования материалов посредством реконфигурируемой оснастки показывают, что в процессе придания детали необходимой формы, на привод формующих стержней воздействуют взаимовлияния от перемещений соседних стержней. Данное взаимовлияние выражается в увеличении момента нагрузки на стержень, при одновременном перемещении соседних стержней. В реальности сценарий формования может быть любым, зависящий как от величины перемещения стержней, так и от их количества. Поэтому предугадать на какой из стержней будет оказываться взаимовлияние и определить величину этого взаимовлияния проблематично не только в области физического моделирования, но и математического. Стоит отметить и влияние на процесс формования скорости деформации (или скорость формования); превышение допустимых значений которой может привести к появлению дефектов на детали, а также чрезмерной перегрузке оборудования. Именно поэтому скорость линейного перемещения стержней была ограничена на уровне 10 мм/мин, что позволяет существенно снизить усилия формообразования и повысить показатель деформируемости материала.

Как известно, компенсировать вредное влияние взаимосвязи можно либо путем введения дополнительного канала, либо возложив дополнительную функциональную возможность на основной регулятор контура регулирования. Первый подход ведет к усложнению системы регулирования, а передаточная функция компенсирующего канала не всегда физически реализуема. При использовании второго подхода от регулятора потребуются адаптация к изменению параметров контура регулирования. Необходимо отметить, что ряд параметров технологического процесса формования, оказывающих негативное

влияние на точность позиционирования, не поддается количественной оценке, а может быть охарактеризован только качественными величинами (структура материала, распределение примесей в сплаве и т. п.)

Поэтому целесообразно задачу автоматической компенсации взаимовлияний вместе со стабилизацией выходного параметра перевести в область нечеткого управления.

Структурно нечеткая взаимосвязанная система регулирования может быть реализована с собственным НЛР в каждом локальном канале управления, но интеллектуальные свойства нечеткого регулятора, проявляющиеся в возможности формировать корректирующее воздействие на конкретном выходе в функциональной зависимости только от конкретных входных параметров, позволяет в рассматриваемом случае обойтись одним нечетким логическим контроллером (НЛК). В этом случае НЛК условно можно представить состоящим из нескольких отдельных каналов, часть из которых используются для управления конкретными локальными каналами, а другая часть для решения основной задачи взаимосвязанной системы регулирования – компенсации взаимовлияния каналов друг на друга. Функциональная схема взаимосвязанной системы с НЛК приведена на рисунке 7.

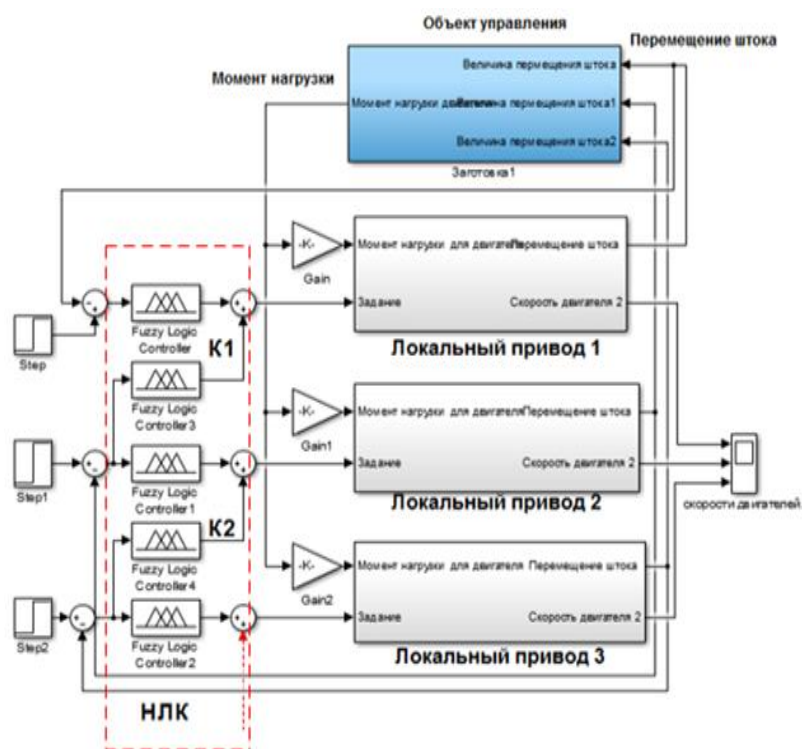


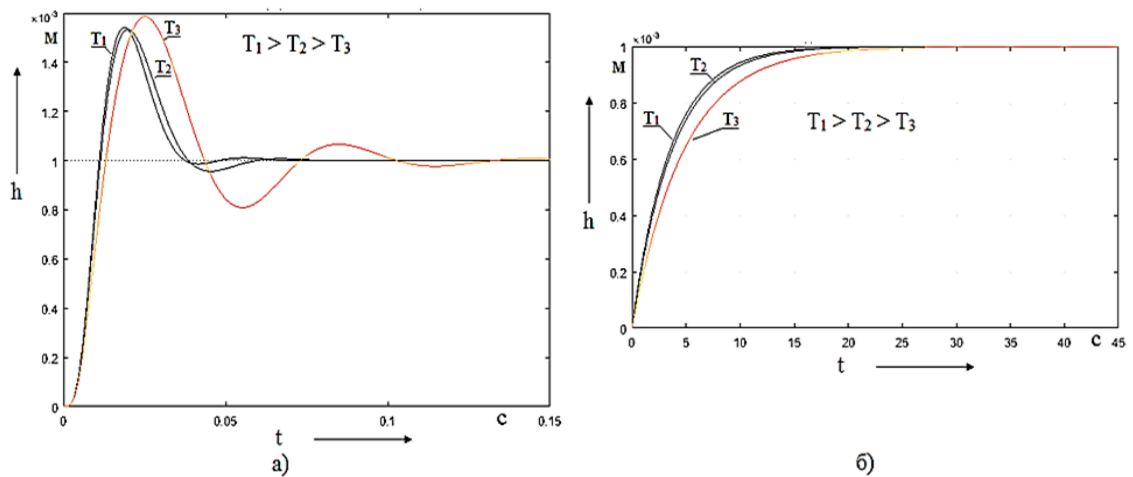
Рисунок 7 – Функциональная схема нечеткой взаимосвязанной системы управления для варианта трехточечного расположения стержней

Для обеспечения желаемых динамических показателей каждого локального канала регулирования целесообразно на входах соответствующих нечетких регуляторов (Fuzzy1, Fuzzy2...) использовать информацию об ошибке и ее интегральной составляющей. В силу того, что степень взаимовлияния каналов неоднородна, то нечеткие компенсирующие каналы с регуляторами

Fuzzy  $k_i$  достаточно применять в каналах обладающих большей информативностью. Наиболее просто реализация поставленной цели в нечетком виде достигается при использовании алгоритма нечеткого вывода по Сугено в регуляторах локальных каналов и нечеткого логического вывода по Мамдани – в регуляторах компенсирующих каналов.

Оценим адаптационные свойства нечеткого регулятора при изменении параметров формующего материала. Известно, что при снижении температуры в процессе формования повышается предел текучести и проявляется упрочнение заготовки, что ведет к существенному увеличению нагрузки на формующий стержень. Поэтому можно считать, что существенным фактором, влияющим на поведение заготовки, является температура, с этой целью рассмотрим поведение систем при её снижении. Для иллюстрации на рисунке 8 показана реакция системы управления позиционированием одного стержня, где в качестве возмущающего фактора выступает температура заготовки. На этом же рисунке приведена аналогичная характеристика, но с применением нечеткого регулирования.

Система с ПИ-регулятором с ростом нагрузки на привод обрабатывает тестовый сигнал с большим перерегулированием и временем переходного процесса. В случае же с нечеткими регуляторами система не имеет перерегулирования, хотя и время переходного процесса достаточно велико. Запас по амплитуде в обоих случаях не существенно меняется при увеличении усилия формования, однако в системе с нечеткими регуляторами этот запас несколько выше. Ситуация с запасом по фазе несколько иная, система с ПИ-регулятором имеет невысокий запас по фазе, который с ростом нагрузки падает. В то же время, система с нечетким регулятором имеет весомый запас по фазе, который с ростом нагрузки практически не меняется.

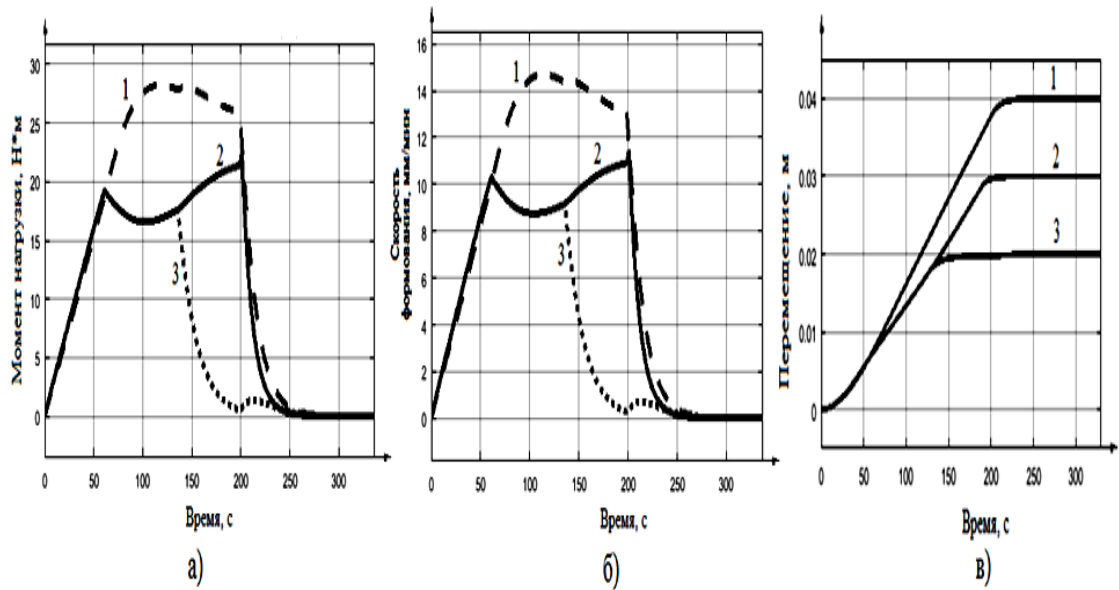


а – ПИ-регулятор; б – нечеткий регулятор

Рисунок 8 – Переходная характеристика системы при различной температуре заготовки

На рисунке 9 показаны результаты моделирования нечеткой трехточечной взаимосвязанной системы управления процессом формования.





а – моменты нагрузки приводов; б – скорость формования; в – перемещение стержней

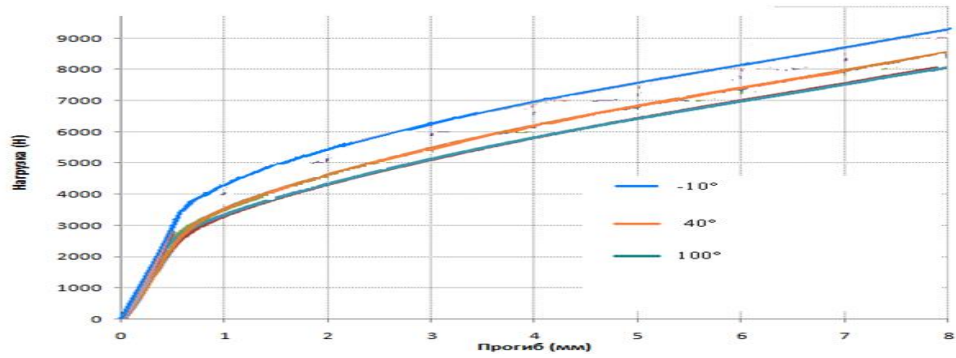
1 – центральный стержень; 2 – левый стержень; 3 – правый стержень

Рисунок 9 – Результаты моделирования

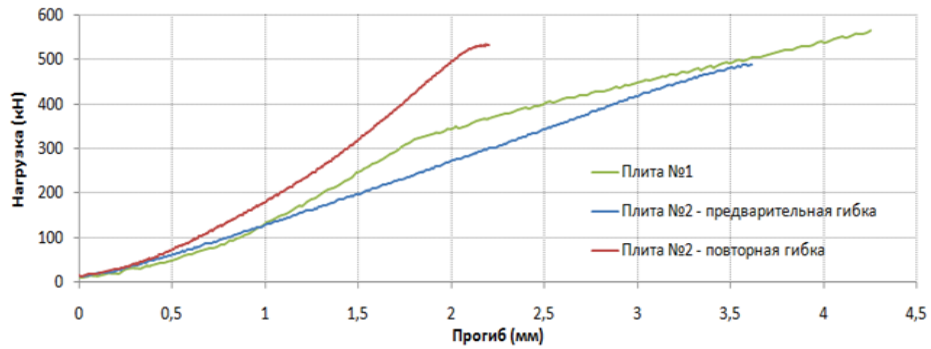
Анализ результатов моделирования наглядно показывает, что реализация регуляторов скорости и положения в системе управления позиционных синхронных электроприводов стержневой установки по нечетким алгоритмам позволяет практически исключить взаимовлияние приводов. Однако система управления с нечеткими регуляторами более инерционна по сравнению с системой с классической настройкой регуляторов, но учитывая то, что технологический процесс формования не требует крайне высоких скоростей, так как в случае быстрого перемещения стержня возможно появление дефектов на детали (вмятины, трещины, изломы), и то, что в процессе формования важнейшей задачей является поддержание скорости формования не зависимо от величины взаимовлияния от работы соседних стержней применение описанного подхода для построения такой системы является оправданным.

**В 4 главе** для проверки адекватности разработанных математических моделей и подтверждения работоспособности предложенного нечеткого алгоритма управления взаимосвязанной системой управления процессом высокотемпературной многоточечной формовки было проведено его экспериментальное исследование на физическом макете.

Вначале проводилась оценка максимального усилия приходящегося на формирующий стержень локального электромеханического модуля линейного перемещения и усилий, приходящихся на оппозитные стержни. Для данного исследования использовали гидравлический пресс, с помощью которого воздействовали на пуансон при прогибе балки и плиты. Диаграммы изменения нагрузки на пуансоне при прогибе представлены ниже на рисунке 10.



(а)



(б)

(а) при прогибе балки, (б) при прогибе плиты  
 Рисунок 10 – Диаграмма изменения нагрузки на пуансоне при прогибе

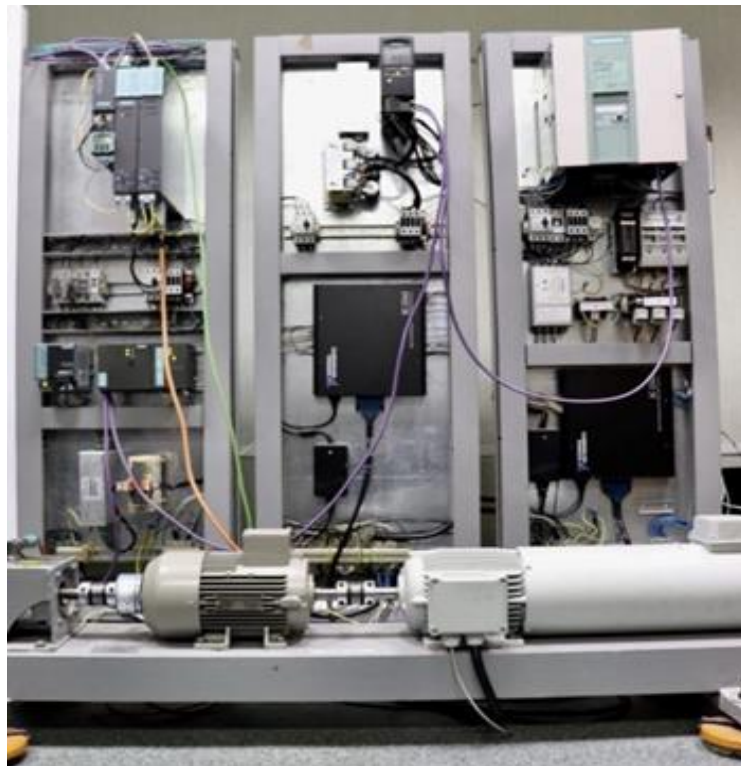


Рисунок 11 – Общий вид учебно-исследовательского стенда по приводам Сименс



На основании данного исследования были выявлены максимальное усилие, приходящееся на формующий стержень и примерный характер изменения усилия, обусловленного взаимодействием стержней.

Далее на базе учебно-исследовательского стенда по приводам Siemens на основе технологий National Instruments, общий вид, которого показан на рисунке 11, проводилось экспериментальное исследование системы управления позиционным электроприводом.

В рамках эксперимента синхронный электропривод выступал в роли привода линейных перемещений, а на электропривод постоянного тока возлагалась задача создания на валу синхронного двигателя нагрузки соответствующей требуемому усилию для создания необходимого прогиба с учетом дополнительной составляющей, обусловленной наличием взаимодействия. На рисунке 12 представлены осциллограммы динамических кривых основных параметров системы управления в классическом варианте при отработке системой позиционирования нагрузки постоянного вида и комбинированного вида нагрузки (постоянной с дополнительным усилием, обусловленным наличием взаимосвязи).



Рисунок 12 – Осциллограммы динамических кривых основных параметров системы управления в классическом варианте при отработке системой позиционирования нагрузки постоянного вида и комбинированного вида нагрузки

Анализ кривых показывает, что в случае появления дополнительного усилия наблюдается появление статической ошибки при отработке заданного перемещения.

На рисунке 13 представлены осциллограммы динамических кривых основных параметров системы управления при отработке системой позиционирования нагрузки постоянного вида и комбинированного вида нагрузки с нечеткими регуляторами.

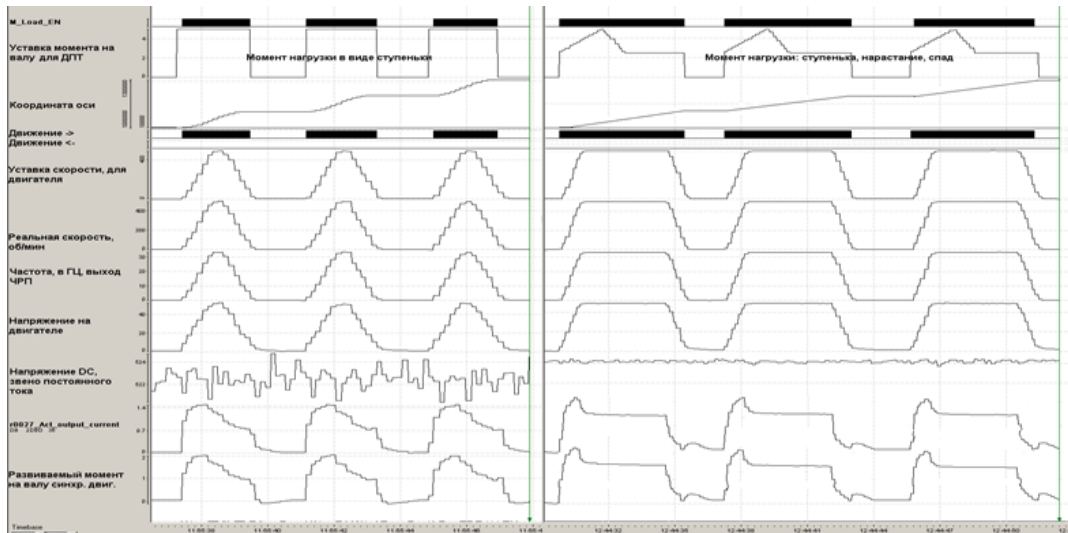


Рисунок 13 – Осциллограммы динамических кривых позиционного локального электропривода при комбинированном характере нагрузки с нечеткими алгоритмами управления.

Анализ полученных кривых показывает, что использования нечеткого подхода в построении системы управления процессом многоточечного формования позволяет существенно ослабить взаимовлияние локальных электроприводов при достижении приемлемых показателей позиционирования.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1 Критический анализ известных решений в области процессов предварительного формования крупногабаритных плоских изделий показал, что наиболее перспективным вариантом реализации такого процесса является процесс многоточечного формования на базе электромеханических модулей. Такой подход расширяет функциональные возможности систем управления процессом и позволяет контролировать параметры процесса формообразования при изготовлении заготовки.

2 Разработано математическое описание процесса формования как объекта силового воздействия электромеханического модуля, отличительной особенностью которого является возможность учета в усилии нагрузки, воздействующей на вал двигателя, как размеров формируемого материала, так и свойств материала (модуля пластичности, пруженения). Для учета динамических свойств процесса формования предложено упрощенное выражение передаточной функции процесса.

3 Создана имитационная модель трехточечного узла формования листового материала, позволяющая оценить взаимовлияние локальных

электромеханических модулей в процессе формования, а также выявить влияние свойств материала на процесс формования.

4 По результатам конечно-элементного анализа в среде Femap, выявлено, что наиболее высокий коэффициент взаимосвязи локальных электромеханических модулей с электромеханическим модулем, осуществляющим основное формирующее воздействие, принадлежит электромеханическим модулям, располагаемым по вертикали и горизонтали от основного модуля.

5 Теоретически обоснована целесообразность использования нечеткого подхода во взаимосвязанной системе управления многоточечного формования листового материала в силу того, что зависимость ряда параметров объекта (коэффициенты пластичности, упрочнения) от температуры можно описать только качественными показателями.

6 Предложено два варианта построения взаимосвязанных систем управления многоточечного формования листового материала с компенсацией взаимовлияния между локальными электроприводами формирующих стержней.

7 Предложена методика настройки нечетких регуляторов скорости и положения локальных электроприводов формирующих стержней, обеспечивающая одновременную реализацию двух функций: компенсацию взаимовлияния между локальными электроприводами при достижении приемлемых результатов позиционирования.

8 Проведено экспериментальное исследование системы управления позиционным электроприводом на физическом макете, нагрузка которого сформирована с учетом взаимовлияния соседних электроприводов. Результаты проведенного экспериментального исследования доказали адекватность теоретических расчетов, полученных на математических моделях.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.*

1 **Чжо Аунг Хтет.** Имитационная модель трех точечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / Чжо Аунг Хтет, Соловьев В.А, Дерюжкова Н.Е, Тетерин В.В // Журнал Научно-технический вестник Поволжья.- 2018 - № II.- С 86 – 90.

2 **Чжо Аунг Хтет.** К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объектного формирования / Чжо Аунг Хтет, Соловьев В.А, Дерюжкова Н.Е // Ученые записки «Науки о природе и технике».-2017 -№ II.- С 54 – 57.

3 **Чжо Аунг Хтет.** Нечеткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки / **Чжо Аунг Хтет,** Соловьев В.А, Дерюжкова Н.Е, Тетерин В.В // Журнал Научно-технический вестник Поволжья.- 2019-№ V.- С 77 – 80.

***Публикация включённая в базу цитирования Scopus.***

**4 Kyaw Aung Htet.** Fuzzy-based multi-point interconnected control system of electrical drives for sheet metal forming / Kyaw Aung Htet, Vyacheslav Alekseyevich Solovyev, Nelly Egorovna Deryuzhkova // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 3-4 Oct. 2018, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602706.

***Публикации в других изданиях.***

**5 Чжо Аунг Хтет.** Оценка статических и динамических характеристик листового материала как объекта регулирования многоточечной системы объектного формирования / Чжо Аунг Хтет// Материалы отчетной конференции аспирантов Республики Союза Мьянма, Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГТУ", 2 ноября 2016 г. С 33 – 34.

**6 Чжо Аунг Хтет.** Особенности построения многосвязной системы объемного формования/ Чжо Аунг Хтет// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов , Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. С 1174 – 1177.

**7 Чжо Аунг Хтет.** Оценка параметров синхронного двигателя для систем стабилизации момента / Чжо Аунг Хтет, Соловьев В.А // Международная научно-практическая конференция, «Электротехнические комплексы и системы», Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 19 октября 2017г. С 28 – 30.

**8 Чжо Аунг Хтет.** К оценке глубины взаимосвязи системы электроприводов, реализующих процесс формирования листового материала / Чжо Аунг Хтет, Тетерин В.В// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г. С 500 – 504.

**9 Чжо Аунг Хтет.** Исследование взаимосвязанной системы позиционных электроприводов стержневой установки / Чжо Аунг Хтет, Соловьев В.А, Дерюжкова Н.Е, Тетерин В.В // Электроприводов на транспорте и в промышленности: тр.2 Всерос.начу.-прак.конф.(Хабароскб,20-21 сентября 2018./под.ред.С.В.Власьевского.- Хабаровск:изд-во ДВГУПС, 2018.-423с:ил. ISBN 978-5-262-00831-5).-С 253 – 256.

**10 Чжо Аунг Хтет.** Математическая модель взаимосвязанной системы электроприводов процесса объемного формования листового материала/ **Чжо Аунг Хтет**, Тетерин В.В // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018 г. С 496 – 499.

Подписано в печать 16.3.2020.  
Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Бумага  $80 \text{ г/м}^2$ . Ризограф EZ570E.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.