

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор ФГБОУ ВО

«Южно-Российский государственный

политехнический университет

(НПИ) имени М.И. Платова»

доктор технических наук, профессор

Разоренов Юрий Иванович



» 11 2018 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» на диссертационную работу Артур Марии Хамильевны «Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов температурных режимов индукционного нагрева», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)

#### Актуальность темы диссертации

В настоящее время на предприятиях машиностроительной и металлургической отраслей для нагрева металлических заготовок перед обработкой давлением широкое распространение получил энергоемкий технологический процесс индукционного нагрева, который обладает многочисленными преимуществами перед конкурирующими технологиями.

В настоящее время доля индукционного нагрева в кузнечно-штамповочном производстве составляет около 80% процентов. Многие виды деталей, получаемых путем обработки металлов давлением (валы, оси, цилиндры и т.п.), изготавливают из заготовок цилиндрической формы, для нагрева которых чаще всего используются проходные цилиндрические нагреватели.

Максимальная энергоэффективность технологического процесса пластического формоизменения и высокое качество конечной продукции обеспечиваются при согласованной работе технологического комплекса «нагрев - обработка давлением», в котором на стадии нагрева необходимо обеспечить

достижение требуемого температурного поля нагреваемой заготовки и его стабилизацию в пределах временного интервала, определяемого темпом работы деформирующего оборудования. Замкнутые системы автоматического управления технологическим процессом индукционного нагрева позволяют обеспечить достижение заданных температурных кондиций нагреваемых заготовок и их стабилизацию в течение требуемого времени при минимальном энергопотреблении.

В связи со сказанным тема диссертационной работы Артур М.Х., посвященной поиску алгоритма оптимального управления температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических заготовок в замкнутых системах, обеспечивающих минимальную погрешность достижения температурных кондиций при минимальном расходе энергии на процесс управления, является актуальной.

### **Научная новизна работы**

В диссертации получен ряд новых научных результатов, которые позволяют решать задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов в замкнутых системах управления технологическим процессом индукционного нагрева.

1. Впервые разработана методика решения задачи аналитического конструирования регулятора температурного режима индукционного нагрева цилиндрических заготовок, оптимального по критерию, представляющему собой сумму среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения распределения температурного поля от заданного и энергетических затрат;

2. Предложен алгоритм оптимального управления в системе с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки, обеспечивающий минимум среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения распределения температурного поля от заданного при минимальном расходе энергии на процесс управления.

3. Разработаны и интегрированы в контуры управления проблемно-ориентированные нелинейные численные модели электротепловых полей, позволяющие исследовать изменение температурного распределения нагреваемой стальной цилиндрической заготовки в процессе периодического индукционного нагрева в системах оптимального управления с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки.

## **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации**

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается корректным применением математического аппарата, теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, теории теплопроводности, теории электромагнетизма, методов численного моделирования и программных средств для их реализации.

Адекватность разработанного в диссертации алгоритма оптимального управления температурным режимом индукционного нагрева подтверждается результатами вычислительных экспериментов с использованием ПК MATLAB и ANSYS и сравнением с экспериментальными данными.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация изложена на 140 страницах, состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы из 114 наименований, содержит 50 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения.

В первой главе рассмотрена проблема оптимального управления техническими системами с распределенными параметрами и приведен обзор основных работ, посвященных решению задач оптимального управления распределенными объектами. Рассмотрена содержательная постановка задачи синтеза оптимальных замкнутых систем с распределенными параметрами и представлен обзор существующих методов решения этой задачи. Сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, обосновано применение аналитического конструирования оптимальных регуляторов на основе метода динамического программирования для синтеза оптимальной замкнутой системы управления процессом индукционного нагрева.

Во второй главе перечислены необходимые исходные данные для корректной постановки задачи управления процессом индукционного нагрева металла, рассматриваемым как объект с распределенными параметрами. Сформулирована и решена задача синтеза системы оптимальной стабилизации радиального температурного распределения в центральном сечении цилиндрической заготовки в процессе индукционного нагрева с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки. С помощью метода динамического программирования найден алгоритм оптимального управления в системе с обратной связью при неполном измерении состояния.

В третьей главе описаны разработанные автором проблемно-ориентированные нелинейные численные модели взаимосвязанных

электромагнитных и температурных полей в процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок. С использованием разработанных моделей исследован технологический процесс индукционного нагрева в системах оптимальной стабилизации температурного распределения заготовки с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки. Произведен анализ полученных результатов и обоснована их практическая применимость при построении замкнутых систем автоматического управления температурными режимами индукционного нагрева в условиях неполного измерения состояния управляемого объекта. Предложена техническая реализация замкнутых систем управления с разработанным оптимальным регулятором в контуре с использованием современных управляющих и измерительных средств.

В заключении перечисляются основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на 7 научных международных и всероссийских конференциях.

Научные результаты диссертации изложены в 11 опубликованных работах, основные научные результаты - в 4 научных статьях в периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 научной статье в издании, индексируемом в базе SCOPUS.

### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

Научная и значимость диссертации заключается в том, что в ней предложена методика решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов, и в результате решения этой задачи получен алгоритм управления, оптимальный по критерию в форме линейной свертки интегральной квадратичной ошибки регулирования и расхода энергии на процесс индукционного нагрева.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что построение замкнутых систем на основе разработанного в диссертации алгоритма оптимального управления позволяет сократить энергозатраты на процесс индукционного нагрева и улучшить качество готовых изделий, за счет повышения точности достижения требуемой температуры заготовки перед обработкой давлением.

Научная и практическая значимость результатов работы объективно подтверждается тем, что полученные в диссертации теоретические положения, выводы и рекомендации использованы:

- при выполнении научных исследований по программе «Леонард Эйлер» при поддержке Немецкого фонда академических обменов;
- при выполнении НИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»;
- при выполнении НИР по Программе научно-технической модернизации и повышению квалификации молодых ученых России Регионального общественного Фонда содействия отечественной науке;
- при выполнении НИР по проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№ 13-08-00926, № 13-08-00926);
- при выполнении НИР по проектам в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ (№ 7.668.2011, №10.3260.2017/4.6);
- в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Разработанный в диссертационной работе алгоритм оптимального управления нагревом цилиндрических металлических заготовок перед операциями пластической деформации рекомендуются к внедрению на ПАО «Салют» (г. Самара), «Алкоа СМЗ» (г. Самара), в ПАО «Кузнецов» (г. Самара), на АО «Красмаш» (г. Красноярск) и на других предприятиях машиностроительной промышленности России.

Рекомендуется использовать материалы диссертации в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлениям подготовки «Управление в технических системах», «Системный анализ и управление» и «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

#### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Обоснование выбора значений весовых коэффициентов в критерии оптимальности нуждается в более подробных пояснениях.
2. В работе не определены ограничения, при которых становится возможным использование одного датчика для контроля пространственно-распределенного температурного поля нагреваемой заготовки, и остаются

неясными требованиями, предъявляемые к датчику температуры, при которых становится возможным подобный контроль.

3. Нечетко определены условия, при которых алгоритм синтеза оптимального регулятора, разработанный для одномерной модели процесса нагрева, может быть распространен на систему управления двумерной численной моделью.

4. Было бы желательно привести более развернутое описание технической реализации замкнутой системы управления двумерной численной моделью процесса индукционного нагрева.

5. Имеется ряд неточных формулировок и технических ошибок.

Указанные замечания не снижают ценности и значимости диссертационной работы.

### **Общая оценка работы**

Диссертация Артур М.Х. представляет собой последовательно изложенную, аргументированную, завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи определения алгоритма управления, оптимального по критерию в виде взвешенной суммы среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения распределения температурного поля от заданного и энергетических затрат на процесс нагрева, а также приведены результаты исследования работы найденного алгоритма с использованием нелинейных численных моделей, интегрированных в замкнутые системы оптимального управления, что имеет значение для развития автоматизации управления технологическими процессами.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, изложена технически грамотным и правильным языком, написана в форме, позволяющей получить полное и ясное представление о полученных автором результатах.

Автореферат полностью соответствует диссертации.

Диссертационная работа удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы), а ее автор, Артур Мария Хамильевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв подготовил профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» д.т.н., профессор Лачин Вячеслав Иванович.

Диссертационная работа Артур М.Х. «Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов температурных режимов индукционного нагрева» заслушана, обсуждена и отзыв одобрен на заседании кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (протокол № 4 от 25.10.2018 г.).

Профессор кафедры  
«Автоматика и телемеханика»  
ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени  
М.И. Платова», д.т.н., профессор

Вячеслав  
Иванович  
Лачин

Заведующий кафедрой  
«Автоматика и телемеханика»  
ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени  
М.И. Платова», к.т.н., доцент

Владимир  
Борисович  
Дьяченко

Подписи Лачина В.И., Дьяченко В.Б.  
заверяю

Ученый секретарь  
ученого совета ЮРГПУ(НПИ)



Н.Н. Холодкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Адрес: 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Телефон: (8635) 223-344, 255-514

E-mail: rektorat@npi-tu.ru