

ОТЗЫВ

официального оппонента КАЗАРИНОВА ЛЬВА СЕРГЕЕВИЧА,
доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Автоматика
и управление» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)», г. Челябинск,
на диссертационную работу Попова Антона Валерьевича «Оптимальное
проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе
поверхностной закалки», представленную на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация
и управление технологическими процессами и производствами (технические
системы)»

1. Актуальность диссертационного исследования

В настоящее время в технологических процессах поверхностного упрочнения металла широко применяется индукционный нагрев, который по основным качественным показателям оказывается эффективнее традиционных способов нагрева. Типовые индукционные нагревательные установки, используемые в процессе поверхностной закалки, и типовые режимы их работы часто не способны обеспечить равномерность температурного поля на первой стадии, необходимую для формирования в закаливаемом слое изделия однородной аустенитной структуры. В результате, подобная неравномерность температурного поля может привести к появлению закалочных трещин и выбраковке обрабатываемого изделия.

В связи с вышесказанным актуальной становится основная задача диссертационного исследования, посвященная поиску оптимальных конструктивных параметров индукционных нагревательных установок, а также параметров, определяющих режимы их функционирования, которые обеспечивают получение максимально равномерного температурного поля в упрочняемом слое в конце стадии нагрева при отсутствии локальных перегревов обрабатываемой заготовки.

2. Научная новизна результатов работы

Среди полученных автором основных научных результатов, следует отдельно отметить:

1) предложенную новую методику решения задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностного упрочнения цилиндрических заготовок из конструкционной стали, которая обеспечивает получение максимально равномерного температурного поля в обрабатываемом поверхностном слое детали при наличии интервальной неопределенности основных характеристик стадии нагрева;

2) разработанный алгоритм решения задачи оптимального по быстродействию программного управления при наличии ограничения на максимальную температуру закаливаемой детали;

3) предложенную автором автоматизированную специализированную оптимизационную процедуру на базе альтернативного метода, разработанную

в программном комплексе MATLAB с интегрированной нелинейной численной моделью индукционного нагрева, построенную в программном пакете Altair FLUX.

Приведенные результаты, полученные в диссертационной работе, обладают существенной научной новизной.

3. Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием фундаментальных положений теории электродинамики и теплопроводности, применением математического аппарата и методов теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, а также методов численного моделирования.

Адекватность разработанных в диссертации численных моделей обосновывается совпадением результатов моделирования с результатами эксперимента на лабораторной индукционной нагревательной установке.

Достоверность основных результатов работы.

3.1. Вывод о том, что альтернативный метод параметрической оптимизации имеет определенные преимущества при решении поставленной в работе задачи оптимального проектирования индуктора является достоверным.

3.2. Вывод о том, что сформулирована постановка нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева поверхностной закалки с ограничением на максимально допустимую температуру, является достоверным.

3.3. Вывод о том, что предложена новая методика решения задачи оптимального проектирования индукционной нагревательной установки при наличии интервальной неопределенности основных параметров, является достоверным.

3.4. Вывод о том, разработан алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки, является достоверным.

3.5. Вывод о том, что разработана численная двумерная нелинейная модель стадии нагрева процесса индукционной закалки в конечно-элементном программном комплексе, является достоверным.

3.6. Вывод о том, что разработана специализированная процедура параметрической оптимизации параметров индукционной нагревательной системы в программном пакете MATLAB с интеграцией двумерной нелинейной FLUX модели процесса индукционного нагрева, является достоверным.

3.7. Вывод о том, что в результате численного решения сформулированных задач получено совпадение решений, полученных альтернативным методом и методом AGDEMO, является достоверным.

3.8. Вывод о том, что предложен вариант технической реализации найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки является достоверным.

В качестве перспективного направления дальнейших работ можно рекомендовать переход к рассмотрению более сложной геометрической формы обрабатываемых заготовок.

4. Практическая значимость

Практическая полезность работы определяется тем, что использование полученных в диссертационном исследовании результатов при проектировании индукционных нагревательных систем для поверхностной закалки стали обеспечит повышение качества готовых изделий и снижение затрат на нагрев.

Научная и практическая ценность диссертационной работы также подтверждается использованием полученных результатов при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

- НИР «Численное моделирование и многокритериальная оптимизация нелинейных объектов технологической теплофизики с распределенными параметрами» в рамках базовой части госзадания №2014/199 (2014-2016 гг.);

- НИР по проектам РФФИ «Разработка научно-технических основ интегрированного оптимального проектирования и многокритериального управления электротермическими установками для нагрева металлических полуфабрикатов перед последующей обработкой давлением» (№16-08-00945) и «Оптимальное проектирование и энергоэффективное управление взаимосвязанными электротепловыми полями и термонапряженными состояниями в технологических системах индукционной закалки металлических изделий сложной геометрической формы» (№19-08-00232);

- НИР «Оптимизация по критериям ресурсной ценности, энергосбережения и экологической безопасности организационно-технической системы утилизации отходов нефтегазового комплекса» в рамках проектной части госзадания №520/17;

- при выполнении НИР в рамках государственного задания №0778-2020-0005.

Следует также отметить, что в соответствии с актами об использовании результатов диссертационной работы результаты научных исследований, проведенных Поповым А.В., были использованы при выполнении курсовых работ и при изучении соответствующих учебных дисциплин в ФГБОУ ВО СамГТУ, а также в технологических расчетах в АО «Арконик СМЗ».

Результаты работы рекомендуется использовать в специализированных учебных курсах по АСУ ТП по научно-образовательным направлениям 27.04.04 – Управление в технических системах, 15.04.04 – Автоматизация технологических процессов и производств. Разработанные алгоритмы оперативного нагрева заготовок с высокой точностью могут быть использованы в технологических расчетах широкого круга предприятий машиностроительного профиля.

5. Оценка содержания и оформления диссертации

Диссертационная работа Попова А.В. изложена в форме, позволяющей получить полное и подробное представление о проведенных исследованиях и полученных результатах. Оформление диссертации соответствует

установленным государственными стандартами требованиям. Все заимствования, имеющиеся в работе правомерны, что подтверждается приведенными библиографическими ссылками.

Содержание диссертационной работы соответствует заявленной научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы).

6. Замечания по диссертационной работе

6.1. В соответствии с подходом, изложенным в работе, решение задачи оптимального по быстродействию нагреву заготовки с учетом ограничения на максимально допустимую температуру поверхности нагрева состоит из следующих этапов:

1) выявление общей структуры решения рассматриваемой задачи на основе теории оптимального управления, в частности принципа максимума Понтрягина;

2) сведение рассматриваемой задачи к задаче математического программирования путем параметризации полученной структуры решения;

3) параметрическая оптимизация решения с использованием детализованной модели процесса нагрева заготовки.

В работе на основе детального анализа общего вида оптимального по быстродействию управления была дана параметризация управления на параметры длительности интервалов постоянства управляющих воздействий. При более детальном исследовании с учетом наложенного ограничения на конечную температуру поверхности нагрева на завершающем участке была принята кусочно-постоянная структура управления с параметризацией по амплитуде. При этом возникает вопрос – не будет ли более оптимальной структура управления, когда параметризация управления на данном участке будет производиться как по амплитуде, так и по временным интервалам?

6.2. На стр. 64 текста диссертации исследуется связь числа N неизвестных оптимизируемых параметров структуры управления нагревом заготовки с температурной погрешностью ε в конце интервала нагрева. При этом с ростом N последовательно снижается величина ε . Такой результат строго вытекает из рассмотренной математической постановки задачи. В реальной практике на объект нагрева действуют не только учтенные в математической модели неопределенности, но и возможные неучтенные возмущения. Как показано в работах Ивахненко А.Г. в задачах идентификации и оптимизации вследствие реально действующих неопределенных возмущений сначала погрешность будет снижаться, но после прохождения минимального значения погрешность будет увеличиваться за счет избыточных степеней свободы самого управления. В этом случае оптимальность решения определяется не только математическим моделированием, но и конкретными данными экспериментальных исследований.

6.3. В работе приводится много информации о доступных пакетах программ моделирования. Данная информация обычно помещается в обзоре литературы.

