

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И НАЛАДКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ПРЕЦИЗИОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Бондаренко Д.Н., Демидович В.Б., Оленин В.А., Патанов Д.А.,
Тимошенко Н.В.

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bdn62@mail.ru)

Рассматривается опыт разработки и внедрения системы управления пилотной индукционной установки для прецизионного нагрева титановых длинномерных заготовок. Описаны алгоритмы управления нагревом и протоколирования процесса нагрева, как элемента системы обеспечения качества, реализуемые с использованием промышленного контроллера и панели оператора SIMATIC (SIEMENS).

Решалась задача нагрева перед правкой цилиндрических титановых заготовок (прутков) диаметром 50 - 120 мм длиной 2500 - 5800 мм от температуры 20 °С до 400 - 750 °С с неравномерностью по длине и диаметру ± 20 °С. Установка должна обеспечивать производительность 8 - 10 шт/час для прутков диаметром 50 – 80 мм и 3 - 4 шт/час при диаметре 81 - 120 мм. Площадь разрабатываемой установки ограничена размерами печи сопротивления, выполняющей нагрев 4 прутков за 45 – 50 минут.

При указанных ограничениях на габариты единственным приемлемым решением было использование нагрева с организацией возвратно-поступательных движений заготовки. Такой способ нагрева применяется для нагрева слябов [1], а для цилиндрических заготовок – только в режиме термостатирования. Поэтому стояла задача определения параметров конструкции индукционного нагревателя с электроприводом и выбора темпа ввода энергии, то есть алгоритма управления движениями и тиристорным генератором, питающим индукционную систему.

Заказчиком с самого начала работы было поставлено условие обеспечение алгоритма управления по модели, так как измерение температуры поверхности прутка с использованием пирометрического датчика сильно усложняется значительным разбросом коэффициента черноты между деталями и партиями. Для построения алгоритма управления использовались результаты многочисленных расчетов на двумерной электротепловой модели [2], учитывающей параметры возвратно-поступательных движений.

Достоверность и точность управления по модели определяются весьма многими факторами, поэтому необходимо было предусмотреть возможность подстройки параметров закона управления на этапе наладки и опытной эксплуатации нагревательной установки. Для автоматизации такого процесса необходимо было создание механизма протоколирования параметров

нагрева, тем более, что такая задача входила и в техническое задание, как элемент системы сертификации качества нагрева конкретного изделия.

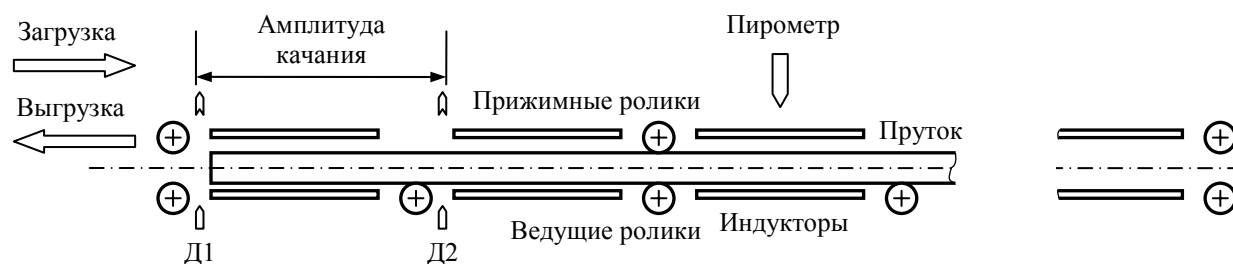


Рис. 1

Конструкция индукционного нагревателя состоит из 8 индукторов, 9 нижних роликов с электроприводом и 4 верхних прижимных роликов (рис.1). Нижние ролики имеют общий вал, через редуктор приводимый в движение асинхронным электродвигателем, питающимся от преобразователя частоты, что обеспечивает возможность регулировки скорости вращения роликов.

Амплитуда качания (870 мм) равна сумме длины индуктора (530 мм) и длины зазора (340 мм), эти размеры призваны обеспечить равномерность нагрева по длине. Для ограничения качания используются оптические датчики перемещения Д1 и Д2. Каждый датчик имеет открытый оптический канал, перекрытие которого позволяет фиксировать момент прохода торца нагреваемого прутка.

Для питания индукционной системы используется тиристорный преобразователь серии ТПЧ мощностью 400 кВт частотой 1000 Гц и выходным напряжением 800 В. Используется двухконтурное водяное охлаждение индукторов и конденсаторной батареи с контролем давления и температуры воды.

По исследованиям на модели определено влияние параметров привода на равномерность нагрева. Параметры воздействия: время торможения и время ускорения, параметры регулирования: амплитуда покачивания и скорость движения заготовки. В качестве рабочей рекомендована скорость 40 мм/с с односекундной выдержкой между движениями.

Для контроля повторяемости должна использоваться технология протоколирования значений факторов, влияющих на качество нагрева, прежде всего – параметров потока электромагнитной энергии и температуры.

Нагрев выполняется в две стадии: первая стадия – ускоренный нагрев на максимальной мощности (уставке напряжения генератора). Вторая – нагрев с пониженной мощностью для выравнивания температуры по сечению и уменьшения градиента температуры за один цикл качания в конце нагрева.

Выключение нагрева и переключение между стадиями осуществляется только после прохождения заготовкой полного цикла качания для создания равных условий нагрева каждой точки по длине заготовки.

Были реализованы два альтернативных способа определения момента переключения на вторую стадию нагрева и параметров этого этапа – уставки

мощности (напряжения) и момента прекращения нагрева с учетом материала, геометрии заготовки и заданной температуры нагрева.

Управление по пирометру: переключение на второй этап нагрева и окончание нагрева осуществляются по показаниям пирометра T_{S1} , контролируемым один раз за возвратно-поступательное движение, когда конец прутка находится под датчиком Д1. Уставка напряжения на первом этапе U_1 близка или равна максимальному выходному напряжению генератора, значение температуры переключения T_1 зависит только от заданной температуры нагрева $T_1 = T_3 - \Delta T_1$. Уставка напряжения на втором этапе U_2 определяется по модели и зависит от диаметра прутка D и заданной температуры нагрева T_3 . Выключение нагрева происходит как при превышении последнего измеренного значения температуры T_{S1} над T_3 на ΔT_{OGR} , так и по «прогнозу» - если прогнозируемое значение температуры в конце следующего движения, рассчитанное по приращению температуры на предыдущем шаге, превысит заданное T_3 на $\Delta T_{OGR_пр}$.

Диаметры D были разбиты с шагом 10 мм (8 значений), диапазон температур – на 4 значения с шагом 100 °С. «Модель» в алгоритме управления была представлена таблицей вида $U_2 = Tab1(D, T_3)$ размерностью $8*4=32$ ячейки. Для уточнения значения напряжения «внутри» двумерной сетки использовалась линейная интерполяция сначала по температуре (дважды), потом по диаметру (по полученным на предыдущем шаге значениям).

Достоинство этого способа в отсутствии зависимости параметров алгоритма от свойств сплава и длины прутка, основной недостаток связан с упоминавшейся ранее зависимостью показаний пирометра от коэффициента черноты. Измерение или ввод оператором значения коэффициента черноты, также как и использование двух- или многочастотных пирометров были отвергнуты заказчиком по технико-экономическим соображениям.

Попытка использовать количество движений в качестве параметра, заменяющего или дополняющего значения температуры поверхности блокировалась сложностью аппроксимации зависимости параметров алгоритма от материала, геометрии прутка и заданной температуры.

Управление по энергии: переключение на вторую стадию нагрева и окончание нагрева осуществляется по значению электромагнитной энергии E_d вложенной в прутки, рассчитываемой по показаниям с генератора (мощность на входе тиристорного инвертора P_d) и времени в моменты, соответствующие положению торца прутка под датчиком Д1. Соотношение значений энергии переключения E_1 и энергии окончания нагрева E_k не зависит от параметров прутка и задания нагрева. Значение энергии окончания нагрева E_k зависит от параметров прутка (сплав, длина и диаметр) и задания нагрева. Уставки напряжения генератора на обоих этапах выбираются так же, как при управлении по пирометру. В этом алгоритме пирометр остается в составе установки для протоколирования динамики

нагрева и вспомогательного канала ограничения нагрева $T_{\text{откл}} = T_3 + \Delta T_{\text{перегр}}$.

Достоинство этого алгоритма в меньшей зависимости качества нагрева от показаний пирометра, недостатки также связаны со сложностью аппроксимации зависимости параметров алгоритма от материала, геометрии прутка, заданной температуры и некоторой зависимостью качества нагрева от начальной температуры прутка и уровня потерь, прежде всего тепловых, которые меняются при прогреве футеровки.

Так как в данном алгоритме больше количество параметров (сплав, диаметр и длина прутка, заданная температура нагрева) и реализация этого алгоритма началась уже после практического апробирования нагрева по пирометру, заказчик пошел на устраивающее его на данном этапе сужение номенклатуры нагреваемых прутков: один тип сплава (ВТ6) и малый разброс температуры нагрева (700 – 750 °С). Поэтому вычисление значения энергии окончания нагрева E_k выполняется по двумерной таблично заданной модели $E_k = \text{Tab2}(D, L)$ с двойной линейной интерполяцией, аналогично вычислению U_2 . Здесь D – по прежнему диаметр прутка, разбитый на 8 значений с шагом 10 мм, L – длина прутка, разбитая на 4 значения с шагом 1000 мм.

Диаметр прутков в одной партии, как правило, одинаков, длина может быть различной. Поэтому наименование сплава и значения диаметра прутка и температуры нагрева должен вводить оператор, длина должна измеряться автоматически в процессе загрузки.

Сначала для измерения длины предполагалось использовать датчики положения и заданное значение скорости загрузки. Однако несогласованность скоростей привода рольганга нагревательной установки и смежного загрузочно-разгрузочного рольганга, их небольшая несоосность, кривизна прутка потребовали выбрать другой датчик измерения длины.

На первом (при загрузке) верхнем прижимном ролике, имеющем на своем валу металлический диск с отверстиями, разместили индуктивный датчик. Один импульс этого датчика соответствует определенному углу поворота ролика и отрезку длины прутка. Дискретность этого датчика составляет 0.8 - 1.6 %, разброс показаний в программе ± 3.5 %, что вполне допустимо.

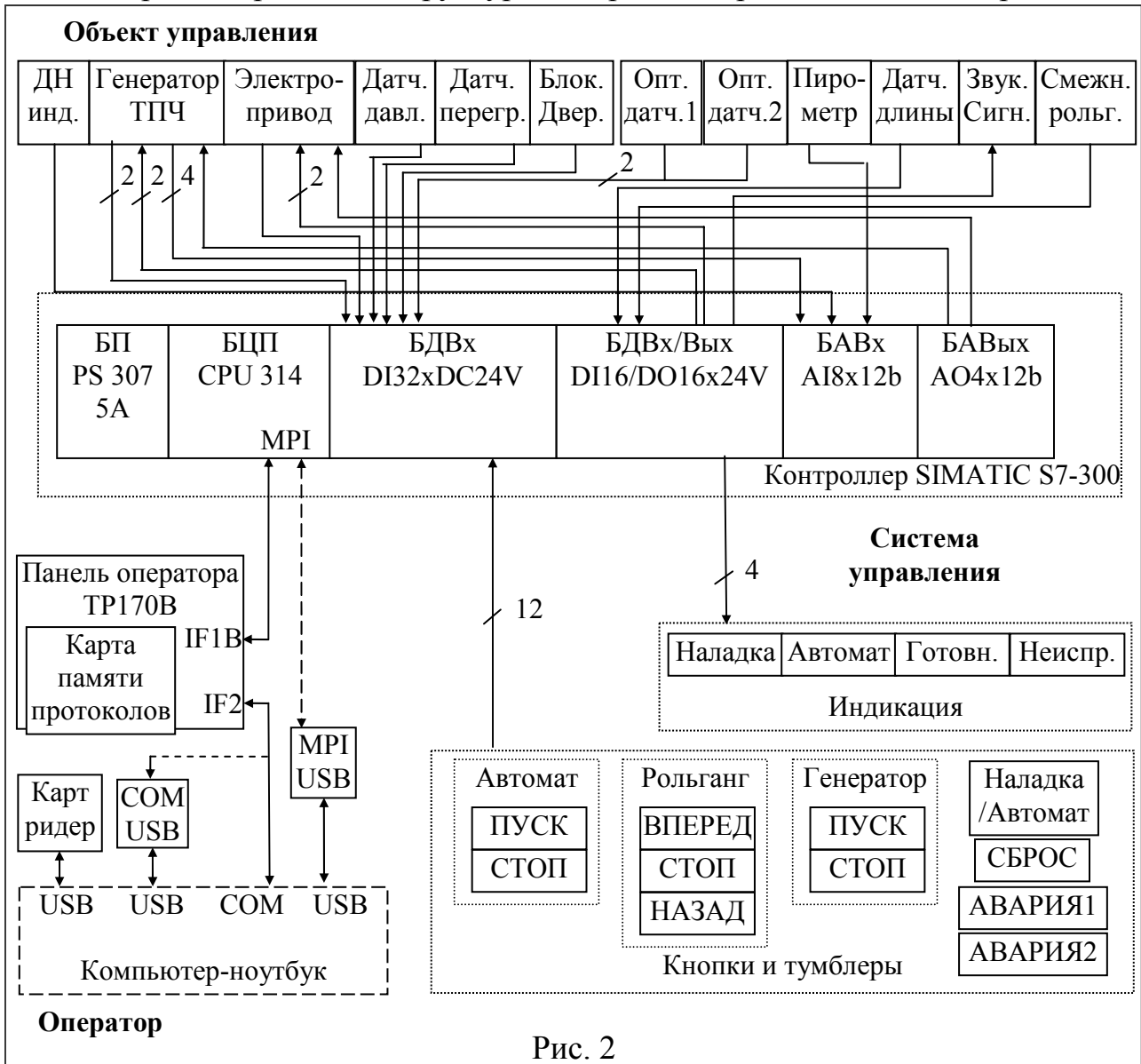
Для проверки качества нагрева был выполнен ряд нагревов различных по диаметру (80 – 110 мм) прутков с термопарами, расположение которых позволило судить о распределении температур по радиусу и длине. Эти опыты позволили настроить параметры движения и нагрева для получения заданного качества нагрева. Сравнение двух алгоритмов показало их примерно одинаковое качество, заказчик отдал предпочтение «по энергии».

Автоматизированная система управления установки индукционного нагрева выполняет следующие функции:

1) Управление движением заготовки (прутка) на этапах загрузки, выгрузки и возвратно-поступательными движениями в процессе нагрева.

- 2) Управление нагревом, т.е. расчет и подача требуемого количества энергии на индукционную нагревательную систему с учетом параметров, заданных оператором (материал, диаметр прутка, температура) и измеряемых с использованием датчиков (длина прутка).
- 3) Защиты и блокировки (генератор, электропривод, охлаждение и др.) с соответствующей индикацией и сбросом.
- 4) Индикация в процессе работы (режим работы, этап движения, температура и время нагрева, номер прутка и пр.).
- 5) Протоколирование параметров нагреваемого прутка и параметров процесса нагрева, в частности, параметров, заданных оператором, параметров алгоритма управления и динамики изменения температуры поверхности и электрического режима. Параметры должны сохраняться на энергонезависимый носитель памяти в формате, удобном для последующего анализа и архивации.
- б) Сервисные функции по настройке параметров системы управления и оборудования.

На рис. 2 приведена структура аппаратных средств автоматизированной



системы управления. «Интеллектуальной» частью системы управления являются программируемый логический контроллер Simatic S7-300 и сенсорная панель управления TP170В, объединенные последовательным интерфейсом MPI [3]. Панель оператора TP170В имеет открытый слот для карты памяти формата Compact Flash Card Type 1, используемой для сохранения файлов протоколов нагрева.

Разработка программного обеспечения контроллера SIMATIC S7-300 и панели оператора TP170В выполнена в едином проекте в пакете Simatic Manager.

Программное обеспечение для контроллера SIMATIC S7-300 состоит из параметров конфигурации операционной системы (настроек), программных блоков и блоков данных. Для конфигурирования операционной системы используется программный пакет HW Config. Для работы с программными блоками и блоками данных использовалась программная среда STEP7 и язык релейно-контактных символов LAD. Отсутствие в последнем механизмов индексной работы с массивами показало целесообразность комплексирования с языком STL или использование С-подобных языков.

Программное обеспечение для панели оператора TP170В состоит из программы конфигурирования, формируемой в графической среде ProTOOL, вызываемой из пакета Simatic Manager. Это позволяет использовать встроенный механизм обмена данными между контроллером и панелью оператора по каналу MPI. Отсутствие механизма архивации в опциях панели TP170В потребовало приспособить для задачи протоколирования данных о нагреве механизма рецептов.

Установка запущена в опытную эксплуатацию. Пилотный проект, требуется накопление данных (протоколов) для оценки повторяемости и выявления факторов дестабилизации. Также требуется получение достоверных сведений по сплавам для расширения номенклатуры нагреваемых прутков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kunda K.J., Peysakhovich V.A., Swanger S. Induction heating befor rolling on the world's largest continuous caster. *Proc. International Congress Electromagnetic Processing Material*, Paris, 1996, 231-237.
2. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Малышев А.А., Скворцов В.Е. Двумерные и трехмерные электротепловые модели индукционных нагревателей. Учеб. пособие по дисциплине «Проектирование электротехнологических установок». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004.
3. SIMATIC Компоненты для комплексной автоматизация. Каталог ST 70. – - Germany, Erlangen, 2005 г. Siemens.