

А. Е. ГОЛОСКОКОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Е. С. ГАВРУСЬ, студентка НТУ «ХПИ»

ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

В даній статті розглянута задача синтезу процедури інтелектуального управління процесом нагріву заготовок в індукційній печі. Описано основні проблеми, пов'язані з даною процедурою, показана актуальність даних проблем та сформульована постановка задачі процедури інтелектуального управління процесом нагріву заготовок в індукційній печі. Описані методи рішення даної задачі та подальші напрямки досліджень.

В данной статье рассмотрена задача синтеза процедуры интеллектуального управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи. Описаны основные проблемы, связанные с данной процедурой, показана актуальность данных проблем и сформулирована постановка задачи исследования процедуры интеллектуального управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи. Описаны методы решения данной задачи и дальнейшие пути исследований.

In given article is considered the problem of synthesis of procedure of intellectual management by process of heating of blanks in the induction furnace. Describes the basic problems connected with given procedure, shown the actuality of the given problems and formulate statement of a research problem of procedure of intellectual management by process of heating of blanks in the induction furnace. Describes methods of the decision of the given problem and the further ways of researches.

Введение. Ускоренный темп роста различных областей промышленности и связанное с ним расширение областей применения процессов индукционного нагрева, значительное увеличение номенклатуры изготавливаемых изделий и необходимость быстрого освоения производства большого числа новых заготовок высокого качества, снижения стоимости их изготовления — все это требует коренного изменения системы технологической подготовки штамповочного производства за счёт использования ЭВМ для автоматизации и оптимизации процессов индукционного нагрева.

Синтез системы автоматического управления нагревательными устройствами зависит от их конструктивных особенностей, технологии нагрева металла и др. Однако, несмотря на различие в назначении и конструкциях нагревательных устройств, системы автоматического управления, в основном, однотипны и являются системами поузловой стабилизации отдельных параметров теплового режима.

Системы поузловой стабилизации отдельных параметров теплового режима, как правило, сконструированные без должного учёта теплотехнических и технологических основ работы нагревательных

устройств и технологических регламентов процесса нагрева. Такими системами предусматривается:

- измерение температур в каждой зоне;
- измерение расхода материалов;
- измерение давления и напряжения;
- автоматическое регулирование температур во всех зонах печи.

Как правило, все печи оснащены узлами аварийной сигнализации и отсечкой воздуха при падении давления [1].

Нагревательные устройства, являются объектами с переменной производительностью, что обычно связано с неравномерной работой оборудования, а также различным сортаментом продукции. При автоматической стабилизации параметров теплового режима обслуживающий персонал вынужден вручную устанавливать новые задачи регулировщикам при всякой смене производительности и различных параметров, причём каждый работник по-своему выбирает конечные задачи параметров, внося субъективный фактор в систему управления и, естественно, во многих случаях приводит к ухудшению качественных и технико-экономических показателей процесса нагрева.

Согласно типовым требованиям технологии, индукционная нагревательная установка (ИНУ) должна обеспечивать достижение заданной конечной температуры изделия, нагревать, с определённой допустимой неравномерностью по его объёму, под которой понимается предельно возможная величина абсолютного отклонения температурного поля от заданной в пределах фиксированной области изменения пространственных координат.

Для того чтобы обеспечить заданные температурные кондиции заготовок в ИНУ должно быть получено соответствующее результирующее температурное поле изделий, которые нагреваются, с учётом последующего периода охлаждения [2].

Таким образом, на основе приведенного выше анализа существующих систем управления процессом нагрева заготовок можно сделать вывод о том, что системы управления, применяемые в настоящее время, обладают определенным числом проблем. К ним можно отнести:

- ручная стабилизация параметров;
- присутствие субъективного мнения при установке параметров нагрева;
- ручная подача на загрузочный стол материалов для изготовления заготовок;
- неточный расчёт параметров нагрева и т.д.

Таким образом, анализ рассматриваемых проблем управления процессом нагрева определяет следующие задачи:

- автоматизация процесса нагрева;

- разработка процедуры интеллектуального управления процессом нагрева;
- оптимизация структуры установки индукционного нагрева.

В данной работе рассматривается решение задачи построения процедуры управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи.

Описание объекта исследования. В данном исследовании рассматривается нагрев прямоугольных листовых заготовок, изготовленных из стали марки 09Г2С. В общем случае, процесс нагрева заготовок такого типа описывается уравнением теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности стали марки 09Г2С.

Для того чтобы более полно описать процесс нагрева, добавим к уравнению (1) начальные и граничные условия.

С учетом того, что начальная температура заготовок равна 20°C , можно записать следующие начальные условия:

$$T(x, y, 0) = 20.$$

Также необходимо дополнить полученные уравнения граничными условиями 1 типа, так как необходимо указать распределение температуры по поверхности тела.

Записав все приведенные выше уравнения в систему, получаем математическую модель процесса нагрева прямоугольных листовых заготовок в индукционной печи:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

$$T(x, y, 0) = 20, \quad (2)$$

$$T(x, y, \tau) \Big|_{x,y=S} = f(x, y, \tau).$$

Полученная система уравнений является математической моделью процесса нагрева заготовок в индукционной печи. Данная модель относится к классу дифференциальных уравнений эллиптического типа [3]. Уравнения такого типа можно решать с помощью численных методов.

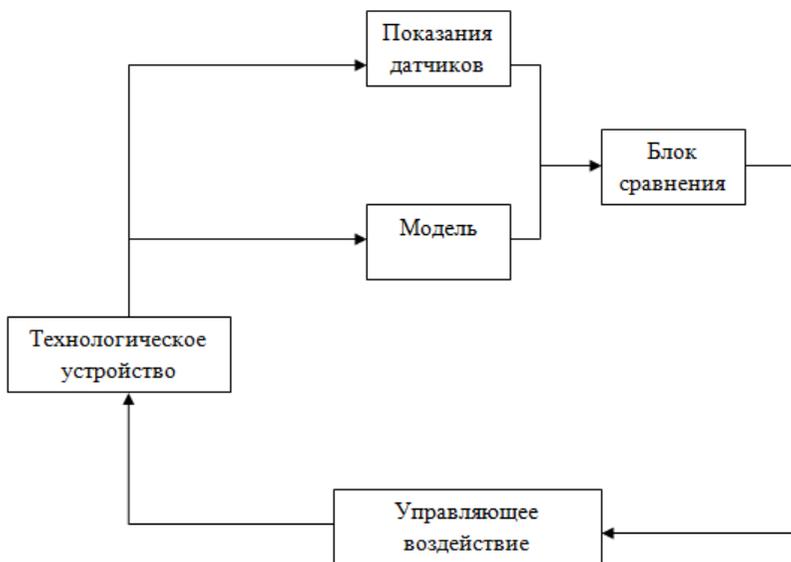
Постановка задачи. В настоящее время существуют различные подходы к решению задачи управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи. К ним можно отнести:

- подход, основанный на применении классической теории управления;
- подход, основанный на применении современной теории управления (оптимальное управление);
- подход, основанный на применении нечеткой логики;
- подход, основанный на применении нейросетевых технологий.

В данном исследовании производится синтез процедуры управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи на основании применения теории нечеткой логики.

Задача синтеза процедуры такого рода состоит в следующем: на основании имеющихся данных о предыдущих нагревах и знании эталонных значений параметров нагрева сформировать такое управляющее воздействие, при котором не было бы перегрева или недогрева заготовок.

Структурно такую процедуру можно представить следующим образом:



Далее приведено подробное описание приведенной схемы.

Изначально, в технологическом устройстве заданы определённые параметры нагрева. Используя эти параметры необходимо сформировать математическую модель процесса нагрева. В данном случае нею будет являться краевая задача, состоящая из уравнения теплопроводности, начальных и граничных условий (2). Далее необходимо решить данную задачу, получив при этом значение распределения температуры по поверхности заготовки в опре-

делённые моменты времени. Такими моментами времени будут выступать моменты замера температуры на контрольных точках.

Следующим шагом будет сравнение эталонных значений температуры, полученных при решении краевой задачи, с реальными значениями температуры на контрольных узлах. Задается значение погрешности ε . Для листовых заготовок, изготовленных из стали марки 09Г2С $\varepsilon = 50^\circ\text{C}$. Если выполняется равенство (3), то параметры нагрева остаются неизменными, в противном случае – необходимо параметры изменить.

$$|t_{эм} - t_{набл}| < \varepsilon, \quad (3)$$

где $t_{эм}$ – значение температуры, полученное при решении краевой задачи (эталонное значение);

$t_{набл}$ – наблюдаемое значение температуры.

Субъективизм при изменении параметров допускать нельзя, поэтому необходимо сформировать новое управляющее воздействие. Данное управляющее воздействие формируется следующим образом. Искусственно вводится нечёткость. Это позволяет интерпретировать параметры объекта управления как нечёткие множества и далее использовать их для построения процедуры управления, которая базируется на нечёткой логике.

Идея нечеткого управления состоит в создании машины нечеткого вывода. Нечеткие системы основаны на правилах продукционного типа, в которых в качестве посылки и заключения используются лингвистические переменные. Целевая установка процесса управления связывается с выходной переменной нечеткой системы управления, но результат нечеткого логического вывода является нечетким, а физическое исполнительное устройство не способно воспринять такую команду. Необходимы специальные математические методы, позволяющие переходить от нечетких значений величин к вполне определенным. В целом весь процесс нечеткого управления можно разбить на несколько шагов: фаззификация, разработка нечетких правил, логический вывод и дефаззификация.

Далее подробно опишем каждый из этих этапов.

На этапе процедуры фаззификации (перехода к нечеткости) точные значения входных переменных преобразуются в значения лингвистических переменных посредством применения некоторых положений теории нечетких множеств, а именно – при помощи определенных функций принадлежности.

В нечеткой логике значения любой величины представляются не числами, а словами естественного языка и называются термами. Так, значением лингвистической переменной «отклонение от эталонного значения температуры» являются термы большое, среднее, малое и т. д.

Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов. Также необходимо определить

степень принадлежности данного физического значения температуры лингвистической переменной «отклонение от эталонного значения температуры» [4].

В основу создаваемой системы управления положены правила продукционного типа. В данном исследовании используются правила вида: «если...то...». Здесь выражение, стоящее после если, называют предпосылкой (условием), а выражение, стоящее после то, – заключением. База правил считается заданной, если задано множество продукционных правил, множество входных и выходных переменных.

P_i : если t_{i1} есть a_{i1} и если t_{i2} есть a_{i2} ...и если t_{ij} есть a_{ij} то ω_i есть $U_{i1}(F_i)j$

$$t_j \in T, a_j \in A, U_i \in U, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

где T – множество входных лингвистических переменных;

A – терм-множество входной лингвистической переменной;

U – терм-множество выходной лингвистической переменной;

F – коэффициент определенности или уверенности, выражающий количественную оценку степени истинности или относительный вес нечеткой продукции;

n – количество правил;

m – количество переменных.

Количество правил будет зависеть от количества входных переменных, а количество подусловий в правиле – от количества контрольных точек замера температуры.

Процедура логического вывода в системах, основанных на продукционных моделях, в принципе не сложная. Как правило, она включает такие части:

- рабочую память (базу данных) – фактические данные, описывающие возможное и текущее состояние предметной области – хранящуюся в оперативной памяти;
- базу продукционных правил, содержащую все допустимые зависимости между фактами предметной области и хранящуюся в долговременной памяти;
- механизм логического вывода.

Первые два пункта, описывающие процедуру логического вывода, были приведены ранее. Далее рассмотрим реализацию механизма логического вывода. Существует несколько алгоритмов нечёткого вывода. К ним относят:

- алгоритм Мамдани;
- алгоритм Такаги–Сугено;
- алгоритм Цукамото;
- алгоритм Ларсена.

В данной работе рассматривается алгоритм нечеткого вывода Мамдани. Этот алгоритм можно представить следующей последовательностью шагов:

- находятся степени истинности предпосылок каждого из правил $a_{ij}(t_{ij0}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, где t_{ij0} – четкое значение входной переменной;
- находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из правил с использованием операции минимум:

$$a_{ij} = \min(a_{ij}(t_{ij0})), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

- затем находятся четкие значения U_{ij} из уравнений:

$$a_{ij} = \omega_i(U_{ij}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

- далее с помощью процедуры дефаззификации получают четкое значение выходной переменной.

Дефаззификацией называется процедура преобразования нечеткого множества в четкое число. В теории нечетких множеств процедура дефаззификации аналогична нахождению характеристик положения (математического ожидания, моды, медианы) случайных величин в теории вероятности. Простейшим способом выполнения процедуры дефаззификации является выбор четкого числа, соответствующего максимуму функции принадлежности. Однако пригодность этого способа ограничивается лишь одноэкстремальными функциями принадлежности.

Существуют следующие методы дефаззификации:

- центра тяжести;
- медианы;
- наибольшего из максимумов;
- наименьшего из максимумов;
- центра максимумов.

Так как замер температуры производится в дискретные моменты времени, то в данном случае для проведения процедуры дефаззификации будет использована следующая формула:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot U_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

где n – количество правил;

m – количество переменных.

Эта формула является дискретным вариантом метода центра тяжести.

Полученное значение здесь рассматривается как температура заготовки на выходе из печи [5].

После того, как управляющее воздействие создано и получены новые параметры нагрева, вся, описанная выше, последовательность шагов повторяется для нового нагрева.

Полученные результаты будут использованы для дальнейших исследований. Будет синтезирована процедура управления процессом нагрева заготовок в индукционной печи на основе применения нескольких подходов.

Список литературы: 1. *Круаивили З. В.* Автоматизированный нагрев стали / *З. В. Круаивили.* – М. : Metallurgy, 1973. – 328 с. 2. *Альтгаузен А. П.* Электротермическое оборудование / *А. П. Альтгаузен.* – М. : Энергия, 1980. – 460 с. 3. *Рапопорт Э. Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металлов / *Э. Я. Рапопорт.* – М. : Metallurgy, 1993. – 223 с. 4. *Деменков Н. П.* Нечеткое управление в технических системах / *Н. П. Деменков.* – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с. 5. *Кузьмин А. В.* Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / *А. В. Кузьмин.* – Телеком. Горячая линия, 2004. – 143с.

Поступила в редколлегию 20.03.2012