

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА МУНДШТУКА ПРЕССА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ПОДОВЫХ И ДОМЕННЫХ БЛОКОВ

В настоящее время предъявляются высокие требования к техническим характеристикам и качеству электродной продукции при условии снижения производственных затрат. Эти задачи могут быть реализованы внедрением новых технологий и оборудования или модернизацией действующего, в том числе, систем автоматизированного управления технологическими процессами. Так как первое направление сопряжено с большими финансовыми затратами и длительными периодами их окупаемости, то второе является более приемлемым.

При изготовлении заготовок подовых и доменных блоков методом выдавливания на гидравлических прессах применяются системы косвенного индукционного нагрева мундштука [1]. Дефекты, которые снижают качество заготовок, связаны, чаще всего, с нарушением температурных режимов прессования. Системы автоматизированного управления индукционным нагревом не всегда обеспечивают стабильность температурных заданий на рабочей поверхности массивных мундштуков, что наиболее характерно при прессовании заготовок подовых блоков с высоким удельным содержанием графита (70% и более). Рост ликвидности крупногабаритной электродной продукции обуславливает актуальность задачи совершенствования автоматизированной системы управления электрообогревом и его оптимизации, обеспечивающей снижение энергозатрат и требования к качеству.

Из-за значительных трудностей при идентификации электрических и теплофизических параметров системы «индукторы – мундштук - угольно-графитовая масса» как объекта управления и относительной новизны рассматриваемой проблематики число посвященных ей работ ограничено. Для описания индукционного нагрева мундштука пресса в работе [2] исследуется нелинейная модель электромагнитного поля в индукторах с массивными сердечниками, реализованная методом конечных элементов. Она позволяет с учетом особенностей конструкции и режимов работы определить зависимость электрических и энергетических параметров индукторов от силы тока и температуры. Авторами [3] на основе метода многомерного объектно-ориентированного конечного элемента реализована математическая модель тепломассопереноса при изготовлении заготовок подовых и доменных блоком, установлена взаимосвязь температур рабочей поверхности мундштука с мощностью тепловыделения и температурными режимами прессования. При этом вопросы повышения качества регулирования, оптимизации управления электрообогревом, энергоэффективной работы технологического оборудования остаются открытыми.

Целью работы является исследование особенностей работы системы управления косвенным индукционным нагревом мундштука пресса, ее усовершенствование и оптимизация температурных режимов прессования по критерию минимума затрат электрической энергии на цикл прессования.

В настоящее время для управления индукционным нагревом мундштука пресса применяется автоматизированная система [4], представленная на Рис.1, реализовывающая управление индукторами калибра ИК и захода

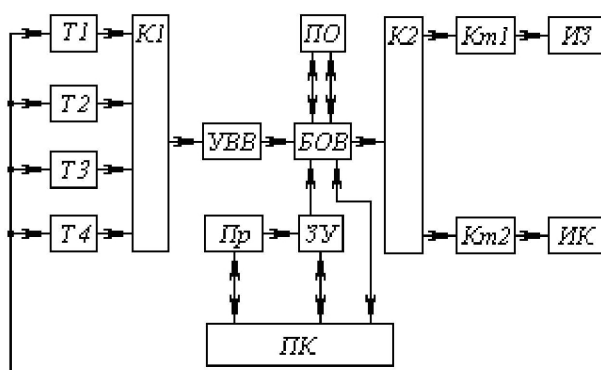


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления электрообогревом мундштука пресса:

ЗУ – задающее устройство; Пр – программатор; ПО

– усовершенствованной системы автоматизированного управления электрообогревом мундштука пресса применяется математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов на основе моделей,

ИЗ и обеспечивающая связь с ПК. Блок обработки и вычислений БОВ через входной К1 и выходной К2 контроллеры и устройства ввода УВв связан с датчиками температуры - термопарами Т1, Т2, Т3, Т4 и контакторами Км1, Км2. На основании информации, полученной от термопар, и с учетом уставок БОВ формирует управляющие сигналы. В этой системе реализованы каналы по температурам мундштука пресса, ввод и хранение уставок для температурных заданий в цифровом виде, программная коррекция нелинейности датчиков температур - термопар, установленных в отверстиях мундштука пресса, Т-регуляторы, задания программы прессования заготовок блоков, визуализация изменений параметров индукционного нагрева (температур, токов в индукторах), хранение и документирование режимов нагрева и прессования.

Для исследования особенностей работы двухканальной – действующей системы и четырехканальной

предложенных авторами ранее в работах [2,3]. Эти модели учитывают нелинейность электромагнитных и теплофизических свойств, особенности конструкции индукторов и мундштука пресса. Для обобщения результатов используются безразмерные переменные:

$$\theta_j = (t_j / t_{pk}) \cdot 100\%, \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

где индексы  $j = 1, 2, 3, 4$  соответствуют температурам в мундштуке под индуктором калибра, над рабочей поверхностью калибра, под индуктором захода, над рабочей поверхностью захода,  $t_{pk}$  – технологическое температурное задание для рабочей поверхности калибра мундштука,

$$Fo = \left[ \frac{\lambda_M}{c_M \cdot \rho_M} \Big|_{t=t_H} \cdot \tau / \Delta R_{прив}^2 \right] - \text{критерий Фурье},$$

$\lambda_M, c_M, \rho_M$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стали мундштука пресса при начальной температуре  $t = t_H$ ,  $\Delta R_{прив}$  – характерный размер в поперечном сечении калибра.

Расчетные результаты представлены на Рис.2. Для двухканальной системы характерна нестабильность температурных режимов прессования. Температура рабочей поверхности калибра изменяется при прессовании заготовок на 10-11%, что соответствует 15-17 °С и подтверждается экспериментальными данными при прессовании заготовок в производственных условиях [3]. Следует также отметить, что снижение порога при T-регуливании температур рабочей поверхности с 1.25% до 0.1% не оказывает сколь-либо заметного влияния на амплитуду их изменения. Значительный разброс температур рабочей поверхности калибра и захода мундштука обуславливает нестабильность распределения поля температур по поверхности заготовок, которое приводит к браку из-за внутренних трещин, надиров на поверхности и, так называемых, «ершей» [1]. Интервал изменения температур в мундштуке под индукторами достигает 28% для захода и 22% для калибра. Это обуславливает низкую энергоэффективность, как за счет снижения мощности индукторов, так и интенсификации теплопередачи в окружающую среду при высоких температурах.

Для устранения указанных выше недостатков рассматривается возможность усовершенствования системы управления за счет дополнительных каналов для температур мундштука под индукторами захода и калибра. Установлено, что на качество регулирования и энергозатраты при индукционном нагреве в процессе прессования заготовок существенное влияние оказывают задания для температур мундштука под индукторами захода и калибра. Их снижение от 134% до 124% приводит к стабилизации температур рабочей поверхности мундштука пресса, разброс которых уменьшается с 11 % до 4-5%, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в производственных условиях во время различных туров прессования заготовок доменных и подовых блоков с обычным и повышенным содержанием графита в угольно-графитовой массе. Дальнейшее снижение температурных заданий для температур мундштука под индукторами захода и калибра сопровождается ростом отклонений от технологических температурных режимов прессования, так как мощность тепловыделения индукторов оказывается недостаточной для компенсации теплопередачи с прессуемой угольно-графитовой массой. Это обуславливает необходимость оптимизации температурных заданий для температур мундштука под индукторами захода и калибра по условию минимума суммарных затрат электрической энергии на цикл прессования:

$$\min \left( \int_{\tau_s}^{\tau_f} \sum P d\tau \right) \quad (1)$$

где активная мощность индукторов компенсирует изменение теплосодержания индукторов, мундштука пресса, прессуемой угольно-графитовой массы, теплопередачу в окружающую среду и с выпрессовкой заготовок блоков:

$$\sum P = U_{ик} \cdot I_{ик}(t_{ик}, \tau) \cdot \cos \phi_{ик} [t_{из}, I(t_{ик}, \tau)] + U_{из} \cdot I_{из}(t_{ик}, \tau) \cdot \cos \phi_{из} [t_{из}, I(t_{из}, \tau)] \quad (2)$$

$$\sum P = \sum_{i=1}^4 \iiint_{V_i} c_i(t_i) \cdot \rho(t_i) \cdot \frac{\partial t_i}{\partial \tau} dv + \sum_{k=1}^m \iint_{S_k} (q_k, ds) + \iiint_{V_M} (w, \lambda \text{grad} t_M) dv, \quad (3)$$

где  $U_{из}, U_{ик}, I_{из}, I_{ик}, \cos \phi_{из}, \cos \phi_{ик}$  – напряжение, сила тока и коэффициент мощности индукторов захода и калибра,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $w$  – скорость прессования.

В соответствии с [2,3], на основании (2) - (3), целевая функция (1) зависит от множества физических, конструктивных и технологических параметров заготовок и угольно-графитовой массы –  $\{F_{II}, K_{II}, T_{II}\}$ , множество физических, конструктивных и технологических параметров мундштука пресса и индукторов –  $\{F_o, K_o, T_o\}$  и множества технологических параметров нагрева и прессования –  $\{T_{TH}\}$ . Совокупность этих множеств образует множество параметров оптимизации

$$\{p\} = \{F_{II}, K_{II}, T_{II}\} \cup \{F_o, K_o, T_o\} \cup \{T_{TH}\} \quad (3)$$

В текущем цикле прессования целесообразно условно выделить два этапа: подпрессовку и прессование заготовок, технологического простоя. В этом случае целевая функция (1) может быть представлена в виде двух слагаемых:

$$\int_{\tau_s}^{\tau_f} P d\tau = \int_{\tau_s}^{\tau_m} P d\tau + \int_{\tau_m}^{\tau_f} P d\tau, \tau_s < \tau_m < \tau_f, \quad (4)$$

каждое из которых определяет затраты электроэнергии соответствующего этапа.

Таким образом, с учетом (4) задаче оптимизации (1) можно поставить в соответствие локальные задачи оптимизации:

$$\min \left( \int_{\tau_s}^{\tau_m} P d\tau \right), \min \left( \int_{\tau_m}^{\tau_f} P d\tau \right), \tau_s < \tau_m < \tau_f. \quad (5)$$

Для локальных задач оптимизации (5) применяется система ограничений, которые устанавливают связи между параметрами оптимизации и описываются дифференциальными уравнениями электромагнитного поля [2] и теплопередачи в производственной системе «индукторы – мундштук – прессуемая угольно-графитовая масса» [3], а также неравенствами вида:

$$\{t_{pz \min} \leq t_{pz} \leq t_{pz \max}, t_{pk \min} \leq t_{pk} \leq t_{pk \max}\} \quad (6)$$

– для температур рабочих поверхностей захода  $t_{pz}$  и калибра.

Так как зависимости между параметрами оптимизации определяются из решения нелинейных задач электромагнитного поля и теплопередачи [2,3], а функциональные свойства локальных целевых функций (5) неизвестны, то целесообразно применение метода упорядоченного перебора [5].

В соответствии с этим методом параметры оптимизации – температуры мундштука под индуктором захода  $t_{m3}$  и калибра  $t_{mk}$  варьируются дискретно с шагом  $\Delta t$ :

$$\{t_{m3 \min}, t_{m3 \min} + \Delta t, \dots, t_{m3 \max}\}, \{t_{mk \min}, t_{mk \min} + \Delta t, \dots, t_{mk \max}\}.$$

Так как в методе упорядоченного перебора шаг варьирования параметров определяет точность решения задачи оптимизации, то применяется их уточнение путем кратного уменьшения шага в области локализации оптимума  $\Delta t_k = \Delta t/k, k > 1$ , что обеспечивает снижение затрат времени на численное решение задачи.

Расчетные результаты для четырехканальной системы управления индукционным нагревом и оптимальным заданием для температуры мундштука под индукторами представлены на Рис. 2. В этом случае амплитуда изменения температуры рабочей поверхности мундштука не превышает 1,8-2,2% и соответствует заданному порогу регулирования. Максимальная температура мундштука пресса снижается на 10-11%, индукторов – на 14-16%, вследствие чего уменьшаются затраты электрической энергии на дополнительный нагрев мундштука на 3,5-4% и компенсацию потерь тепла в окружающую среду на 2-5% по сравнению с двухканальной системой управления.

Таким образом, существующая двухканальная система автоматизированного управления индукционным нагревом мундштука пресса не обеспечивает качество регулирования, стабильность температурных режимов и характеризуется низкой энергоэффективностью. Усовершенствованная четырехканальная система автоматизированного управления улучшает качество регулирования, повышает стабильность температурных режимов прессования, позволяет реализовать оптимизацию температурных заданий, снизить потери тепла в окружающую среду и затраты электрической энергии для индукционного обогрева мундштука пресса.

#### Литература

1. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Андриенко П.Д., Коцур И.М., Ярымбаш Д.С. Применение методов математического моделирования для определения параметров индуктора // Вестник СевНТУ – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С. 117 – 120.
3. Андриенко П.Д., Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления // Электромашинобудовання та електрообладнання – Одесса, 2006. – №66. – С. 291 – 293.
4. Скаржепа В.А., Шелехов К.В., Герасимов А.С. Тиристорные цифровые регуляторы температуры. – К.: Техніка, 1979. – 144 с.
5. Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.С. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. — М.: Энергия, 1976. – 208с.

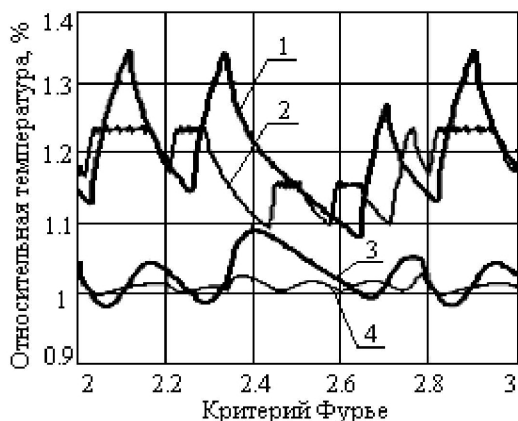


Рис. 2. Изменение температур мундштука:

1 – температура под индуктором до оптимизации; 2 – температура под индуктором при оптимизации; 3 – температура над рабочей поверхностью до оптимизации; 4 – температура над рабочей поверхностью при оптимизации