

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ  
УПРАВЛЕНИИ ИНДУКТОРАМИ ПРЕССА**

**Введение.** Современный этап развития промышленности Украины характеризуется жесткими требованиями к снижению энергозатрат и экономии ресурсов, необходимых для выпуска качественной, ликвидной на внутренних и внешних рынках продукции. Значительное внимание уделяется задачам повышения энергоэффективности при производстве электродной продукции, которое является весьма энергоемким. В техническом плане эти проблемы могут решаться как за счет внедрения новых технологических процессов и нового технологического оборудования с лучшими характеристиками по энергоиспользованию, так и модернизацией действующего оборудования и совершенствованием систем автоматизированного управления технологическими процессами.

**Постановка задач исследования.** При изготовлении заготовок подовых и доменных блоков на прессах с усилием до 63000 кН применяется индукционный обогрев мундштука [1]. Этот способ нагрева обеспечивает заданные температуры нагрева, достаточно равномерное распределение температур рабочей поверхности мундштука [2,3]. Для повышения КПД и коэффициента мощности при работе индукторов на токах промышленной частоты требуется уточнить влияния конструктивных и технологических факторов на затраты тепловой мощности и обеспечить согласование работы индукторов калибра и захода по критерию минимум энергозатрат.

Целью работы является разработка инженерных подходов к реализации задачи оптимального управления режимами индукционного обогрева мундштука пресса при прессовании заготовок подовых и доменных блоков по критерию минимизации затрат энергии.

**Материалы исследования.** Математическая модель технологической системы «индукторы – мундштук – угольно-графитовая масса» описывается нелинейными сопряженными уравнениями теплопереноса с распределенными параметрами и уравнениями электромагнитного поля для индукторов захода и калибра [3,4]. Эта математическая модель может быть преобразована в линейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений [3] относительно контрольных температур  $t$  в поперечных сечениях калибра и захода мундштука:

$$\frac{dt_{i,k}}{dt} = \sum_{k=1}^n a_{i,k} \cdot t_{i,k} + b_k \cdot \eta_{ик} \cdot P_{ик}(U_j, t_{n,j}) + c_k \cdot t_{m,k}, \quad (1)$$

$$\frac{dt_{i,z}}{dt} = \sum_{k=1}^n a_{i,z} \cdot t_{i,z} + b_z \cdot \eta_{из} \cdot P_{из}(U_j, t_{n,j}) + c_z \cdot t_{m,z}, \quad (2)$$

где индекс  $i \in [1..n]$  соответствует температурам в контрольных точках поперечного сечения мундштука,  $a, b, c$  - матрицы параметров модели исследуемой системы.

Системы уравнений (1), (2) замыкаются интегральными уравнениями теплового баланса для индукторов, калибра и захода мундштука, прессуемой массы:

$$\begin{cases} C_{\hat{e}\hat{e}} M_{\hat{e}\hat{e}} \frac{d\bar{t}_{\hat{e}\hat{e}}}{dt} = P_{\hat{e}\hat{e}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{e}}, u_{\hat{e}\hat{e}}) - \alpha_{\hat{i}\hat{e}\hat{i}} F_{\hat{e}\hat{e}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{e}} - t_{\hat{i}\hat{n}}) - \alpha_{\hat{e}\hat{e}\hat{e}} F_{\hat{e}\hat{e}\hat{a}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{e}} - t_{\hat{e}\hat{i}}), \\ C_{\hat{e}\hat{c}} M_{\hat{e}\hat{c}} \frac{d\bar{t}_{\hat{e}\hat{c}}}{dt} = P_{\hat{e}\hat{c}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{c}}, u_{\hat{e}\hat{c}}) - \alpha_{\hat{i}\hat{c}\hat{i}} F_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{c}} - t_{\hat{i}\hat{n}}) - \alpha_{\hat{e}\hat{c}\hat{c}} F_{\hat{e}\hat{c}\hat{a}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{c}} - t_{\hat{c}\hat{i}}), \\ C_{\hat{e}} M_{\hat{e}} \frac{d\bar{t}_{\hat{e}}}{dt} = \alpha_{\hat{e}\hat{e}} F_{\hat{e}\hat{e}\hat{a}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{e}} - t_{\hat{e}\hat{i}}) - \alpha_{\hat{e}\hat{i}} F_{\hat{e}\hat{e}\hat{o}} (t_{\hat{e}\hat{o}} - t_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}) - \alpha_{\hat{e}\hat{a}\hat{u}\hat{o}} F_{\hat{e}\hat{a}\hat{u}\hat{o}} (\bar{t}_{\hat{e}} - t_{\hat{i}\hat{n}}) - \frac{\lambda_{\hat{e}\hat{c}}}{L_{\hat{e}\hat{c}}} F_{\hat{e}\hat{c}} (\bar{t}_{\hat{e}} - \bar{t}_{\hat{c}}), \\ C_{\hat{c}} M_{\hat{c}} \frac{d\bar{t}_{\hat{c}}}{dt} = \alpha_{\hat{e}\hat{c}} F_{\hat{e}\hat{c}\hat{a}\hat{i}} (\bar{t}_{\hat{e}\hat{c}} - t_{\hat{c}\hat{i}}) - \alpha_{\hat{c}\hat{i}} F_{\hat{c}\hat{o}} (t_{\hat{c}\hat{o}} - t_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}) - \alpha_{\hat{c}\hat{o}} F_{\hat{c}\hat{o}} (\bar{t}_{\hat{c}} - t_{\hat{i}\hat{o}}) + \frac{\lambda_{\hat{e}\hat{c}}}{L_{\hat{e}\hat{c}}} F_{\hat{e}\hat{c}} (\bar{t}_{\hat{e}} - \bar{t}_{\hat{c}}), \\ C_{\hat{i}} M_{\hat{i}} \frac{d\bar{t}_{\hat{i}}}{dt} + C_{\hat{i}} F_{\hat{c}\hat{i}} V_{\hat{a}\hat{o}} t_{\hat{a}\hat{o}} - C_{\hat{i}} F_{\hat{e}\hat{i}} V_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} t_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = \alpha_{\hat{c}\hat{i}} F_{\hat{c}\hat{o}} (t_{\hat{c}\hat{o}} - t_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}) + \alpha_{\hat{e}\hat{i}} F_{\hat{e}\hat{o}} (t_{\hat{e}\hat{o}} - t_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $M$  – масса,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $F$  – площадь теплопередачи,  $L$  – длина,  $P$  – активная мощность,  $t$  – температура,  $\bar{t}$  – среднее значение температуры в поперечном сечении,  $\tau$  – время, индексы соответствуют:  $ик$  – индуктору калибра,  $k$  – зоне калибра,  $из$  – индуктору захода,  $з$  – зоне захода,  $ос$  – окружающей среде,  $мц$  – массному цилиндру,  $м$  – угольно-графитовой массе.

При этом сопряженная система уравнений (1) – (3) должна удовлетворять ограничениям на температурные задания:

$$\forall t_{i,k} \in [t_{i,k \min}, t_{i,k \max}], \quad \forall t_{i,3} \in [t_{i,3 \min}, t_{i,3 \max}]; \quad (4)$$

на активную мощность индукторов калибра и захода [4]:

$$P_{ик} = P_{ик}(U_k, t_k), \quad P_{из} = P_{из}(U_3, t_3); \quad (5)$$

на действующие значения напряжения на обмотках индукторов калибра и захода [4]:

$$U_k = [U_{k \min}, U_{k \max}], \quad U_3 = [U_{3 \min}, U_{3 \max}], \quad (6)$$

а также начальным условиям Коши и условию оптимальности по критерию минимума энергозатрат при прессовании заготовок подовых и доменных блоков из массы одного массного цилиндра:

$$\min_{\tau_{нач}}^{\tau_{вых}} \int (P_{ик} + P_{из}) dt, \quad (7)$$

где  $\tau_{нач}$ ,  $\tau_{вых}$  – время начала и окончания прессовки.

Для преобразования сопряженной динамической задачи оптимального управления (1) – (3) с ограничениями (4) – (6) и условием оптимальности (7) применяется комбинированный метод. Размерность задачи сокращается путем ввода точек коллокации на рабочих поверхностях мундштука. Температуры и скорости их изменения в точках коллокации регистрируется с заданным тактом при прессовании заготовок. Вводится дополнительное условие термоуравновешенности мундштука прессы:

$$\int_{\tau_{нач}}^{\tau_{вых}} \frac{1}{T} \cdot \left| \sum_{i=1}^n t_{i,k} - \sum_{i=1}^n t_{i,3} \right| dt \leq \delta(t). \quad (8)$$

Тогда сопряженная динамическая задача оптимального управления с учетом (8) приводится к двум независимым моделям:

математической модели оптимального управления индуктором калибра (1) с ограничениями по первым выражениям в соотношениях (4)-(6) и условию оптимальности

$$\min_{\tau_{нач}}^{\tau_{вых}} \int (P_{ик}) dt; \quad (9)$$

математической модели оптимального управления индуктором захода (2) с ограничениями по вторым выражениям в соотношениях (4)-(6) и условию оптимальности

$$\min_{\tau_{нач}}^{\tau_{вых}} \int (P_{из}) dt. \quad (10)$$

При прессовании заготовок доменных блоков снижаются перепады температур по оси заготовок блоков и прессуемой массы, и, как следствие, выполняется условие

$$t_{вх} \approx t_{вых} \approx t_m. \quad (11)$$

Реализация упрощенных моделей с условиями (9) – (10) с учетом нелинейности уравнений (5), описывающих зависимость активной мощности от действующего значения напряжения и температуры индуктора [4], выполняется по методу упорядоченного перебора значений верхних границ температурных заданий для индукторов калибра и захода. Экспериментальная проверка оптимальных температурных заданий для индукторов калибра и захода при прессовании заготовок доменных блоков и температурные измерения в мундштуке позволили оценить снижение теплопередачи в осевом направлении мундштука с 25-30% до 4-6%, а энергозатрат при прессовании – на 9-12%. Это объясняется как уменьшением теплопередачи в окружающую среду, так и повышением КПД индукторов калибра и захода при более низких температурах этих индукторов.

**Выводы.** Предложен инженерный подход к декомпозиции сопряженной задачи оптимального управления режимами индукционного обогрева мундштука прессы при прессовании заготовок подовых и доменных блоков по критерию минимизации затрат энергии.

Определены оптимальные температурные задания для управления индукторами калибра и захода, обеспечивающие термоуравновешенность мундштука при прессовании заготовок доменных блоков и позволяющие снизить энергозатраты на 9-12%.

#### Литература.

1. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Ярымбаш Д.С., Тютюнник О.В., Загруный О.Л. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье, ЗНТУ, 2006. – №1. – С. 56 – 60.
3. Андриенко П.Д., Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления // Электромашинобудування та електрообладнання. – Одесса, 2006. – №66. – С. 291 – 293.
4. Килимник И.М., Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, КДПУ, 2007. - №4(45) Частина 1. – С. 53 – 55.