

вероятностный анализ контактного сопротивления (в зависимости от количества переключений и несинусоидальности резкопеременного тока).

3. Установлено, что коммутации при резкопеременном характере нагрузки приводят к ускорению эрозии контактов и увеличению их переходного сопротивления.

4. Целесообразно продолжить дальнейшие исследования влияния характера нагрузки, условий эксплуатации и физических характеристик проводящих и изоляционных материалов, а также охлаждающих сред на электротермические процессы в силовых контактах переключающих устройств.

#### Перечень ссылок

1. Плохов И. В. Исследование сопротивления стягивания электрического контакта // Электротехника. – 2004. – № 5. – С. 13–18.
2. Близняков А. В. Качественная характеристика электродугового процесса в жидком диэлектрике // Электротехника та електроенергетика. – 2001. – № 1. – С. 34–37.
3. Власов А. Б. Расчет эксплуатационных показателей надежности контактных соединений с помощью тепловизионного контроля // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 30–35.

4. Раховский В. И., Левченко Г. В., Теодорович О. К. Разрывные контакты электрических аппаратов. М.–Л.: Энергия, 1966. – 249 с.
5. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.
6. Б. В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
7. В. В. Зиновкин, О. И. Сисуненко, С. Л. Сергиенко, Д. В. Зозуля. Нестационарные режимы силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке // Энергетика и электрификация. – 1994. – №5. – С. 48 – 52.
8. Виленкин С. Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979. – 250 с.
9. Кудрявцев Н. Н. Специальные киносъемки. – М.: Искусство, 1978 – 286 с.

*Поступила в редакцию 19.10.06 г.*

*После доработки 03.11.06 г.*

*Наведено результати досліджень електротермічних процесів в контактах перемикаючих пристроїв. Проаналізовано причинно-наслідкові фактори аварійності перемикаючих пристроїв трансформаторного обладнання. Запропоновано методики ймовірнісного аналізу та експериментальних досліджень опору контактів в залежності від несинусоїдності струму і кількості комутацій.*

*The results of electrothermal processes researches in switching devices contacts are given. The cause-sequence factors of switching devices breakdown are analyzed. The technique of probability analysis and experimental researches of contact resistance that depends on non-stationary current and switching quantity are offered.*

УДК 621.365.5

**Д. С. Ярымбаш, А. В. Тютюнник, О. Л. Загрунный**

## **Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков**

*Предложена методика оптимизации управления электрическим обогревом при прессовании заготовок подовых блоков.*

При прессовании заготовок подовых блоков применяются массивные мундштуки для прессов с усилием от 3500 до 6300 кН, оборудованные системами индукционного электрообогрева с автоматическим регулированием температурных режимов прессования. Они, как объекты управления, характеризуются большой потребляемой мощностью и значительной продолжительностью времени работы в динамических режимах [1]. Стабильность температурного режима прессования заготовок из высокотеплопроводной

массы с увеличенным содержанием графита определяет качественный уровень подовых блоков. Дефекты, возникающие из-за нарушения температурных режимов, являются скрытыми и выявляются на завершающих этапах производственного процесса. Это приводит к повышению удельной доли брака в готовой продукции, дополнительному расходу сырья и электроэнергии на дополнительные туры прессования заготовок. Кроме того, существующие системы автоматического управления и температурные задания

для электрообогрева мундштука пресса не обеспечивают высокий уровень качества заготовок подовых блоков новых типов, снижение энергозатрат и стабильность температурных характеристик для разных туров прессования. Поэтому оптимизация системы индукционного электрообогрева массивного мундштука пресса чрезвычайно актуальна.

Целью работы является оптимизация температурных заданий для системы автоматического управления индукторами электрообогрева мундштука пресса, производящего заготовки новых типов подовых блоков.

Для сокращения затрат на аппаратное и метрологическое обеспечение системы автоматического управления целесообразно применить метод математического моделирования [2]. Это позволит расширить диапазон варьирования режимных параметров, определить эффективные температурные задания системы автоматического управления индукторами мундштука, повысить качество заготовок подовых блоков из высокотеплопроводной массы и обеспечить возможность обобщения результатов при прессовании массы с различным содержанием графита.

В соответствии с работой [3] технологическая система «индукторы – мундштук – угольно-графитовая масса», как объект управления с распределенными параметрами, может быть представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных и критериальной форме:

$$\theta_{Fo(i)} = L\theta_i + B\theta_i + p_j(J_j), i = 1,2,3,4, j = 1,2 \forall (i = j), (1)$$

где  $\theta_i, J_j, p_j, F_0$  – относительные температуры, токовые нагрузки, относительные удельные тепловые мощности индукторов и критерий Фурье. Последние определяются соотношениями вида:

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \frac{T_i(\tau) - T_{\min_i}}{T_{\max_i} - T_{\min_i}}, \\ J_j &= \frac{I_j(\tau) - I_{\min_j}}{I_{\max_j} - I_{\min_j}}, \\ Fo &= \frac{\lambda(\theta_3) \cdot \tau}{c(\theta_3) \cdot \rho(\theta_3) \cdot S_{\text{п.с.м}}^2}, \\ p_j &= \frac{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \cos(\varphi_{\text{н}}) \cdot J_j^2}{c(\theta_3) \cdot \rho(\theta_3) \cdot (T_{\max_i} - T_{\min_i}) \cdot V_{\text{и.м.ж}}} \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $L$  – линейный дифференциальный оператор Лапласа;  $B$  – нелинейный оператор, учитывающий зависимость теплофизических свойств объекта от температуры;  $\tau$  – время;  $S_{\text{п.с.м}}$  – площадь поперечного сечения мундштука;  $\lambda, c, \rho$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность соответственно;  $p_j$  – относительная удельная тепловая мощность;  $T_i, T_{\max_i}, T_{\min_i}$  – локальная, максимальная и минимальная температуры соответственно;  $I_j, I_{\max_j}$

$I_{\min_j}$  – действующие значения соответственно текущих, максимальных и минимальных токов в индукторах;  $V_{\text{и.м.ж}}$  – объем индуктора мундштука; индексы  $i = 1,2,3,4$  – соответствуют геометрическим областям индукторов захода и калибра, мундштука и угольно-графитовой массы;  $j = 1,2$  – соответствуют токовым нагрузкам и удельному тепловыделению в индукторах калибра и захода.

Система уравнений (1) с начальными условиями Коши и граничными условиями III и IV рода на основе метода многомерных объектно-ориентированных конечных элементов [3] может быть преобразована в систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F(\theta_{k,j}, \theta'_{k,j}, \theta_{k+1,j}, \theta_{k-1,j}, Fo) &= R_{T_{k,1-2}} \cdot \Delta\theta_{k,1-2}, \\ 1 < k < n-1, j &= 1,2 \end{aligned} \right\} (3)$$

с начальными условиями:

$$\theta_{k,j} \Big|_{Fo=0} = \theta_{\text{к.т}}(0)_k, (4)$$

где  $n$  – число зон в характерных поперечных сечениях мундштука пресса;  $\Delta\theta_{k,1-2}$  – относительный перепад температур между  $k$ -ми многомерными конечными элементами в поперечном сечении мундштука под индукторами калибра и захода,  $R_{T_{k,1-2}}$  – относительные тепловые сопротивления между  $k$ -ми многомерными конечными элементами.

Для повышения точности и достоверности результатов численного моделирования из (3) и (4), выполнено описание температурной зависимости токовых нагрузок индукторов. Динамические массивы данных измерений токов индукторов и температур в контрольных точках мундштука преобразованы из соотношений (2) в критериальную форму и аппроксимированы кубическими полиномами по методу наименьших квадратов [4]:

$$\left. \begin{aligned} J(Fo_i)_j &= \sum_{l=0}^3 \gamma_{l,j} Fo_i^l \quad i \in I = \text{var} \\ \theta_{\text{и.к}}(Fo_i)_j &= \sum_{p=0}^3 \eta_{p,j} Fo_i^p \quad i \in I = \text{var}, j = 1,2. \end{aligned} \right\} (5)$$

Так как функции аппроксимации (5) заданы параметрически, то следует считать определенными функции температурной коррекции относительных токовых нагрузок индукторов:

$$J_j = J(\theta_{\text{и.к}})_j, j = 1,2. (6)$$

При обработке динамических массивов измерений во время четырех туров прессования по методике из (5) и (6) обеспечивается погрешность аппроксимации относительной токовой нагрузки индуктора калибра не более 1,1 %, а индуктора захода – не более 2,1 %.

В соответствии с работой [3] можно упростить описание условий теплообмена между индукторами и мундштуком, а также между мундштуком и прессуемой массой с помощью критериальных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{0 \cup n, j} &= \theta_{к.т} (F_o, p_j)_{j, 0 \cup n} \\ \theta'_{0 \cup n, j} &= \theta'_{к.т} (F_o, p_j)_{j, 0 \cup n}, j = 1, 2 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $\theta_{к.т} (F_o)_{j, 0 \cup n}$ ,  $\theta'_{к.т} (F_o)_{j, 0 \cup n}$  – критериальные зависимости относительных температур и скоростей их изменения в контрольных точках характерного поперечного сечения мундштука пресса под индуктором (0) и над рабочей поверхностью (n).

Процессы электрообогрева и теплопередачи в мундштуке пресса при прессовании заготовок подовых блоков являются циклическими, поэтому в системе уравнений (7) можно применить ортонормированный базис [4]:

$$v(\varpi) = (\varpi^0, \sin(\varpi), \cos(\varpi), \dots, \sin(n\varpi), \cos(n\varpi)) \quad (8)$$

для критериальной функции аргумента  $F_o$  вида:

$$\varpi(\beta_1, \beta_2 F_o) = (\beta_1 \cdot F_o^{\beta_2}).$$

Аппроксимация непрерывных функций  $\theta_{к.т} (F_o)_{j, 0 \cup n}$  ( $j = 1, 2$ ) на дискретных массивах экспериментальных данных для базиса (8) принимает вид:

$$f(F_o)_{0 \cup n} = \sum_{r=1}^R \alpha_{r0 \cup n} v_r(\beta_{10 \cup n}, \beta_{20 \cup n}, F_o). \quad (9)$$

При этом неизвестные коэффициенты  $\{\alpha_{r0 \cup n}\}_{r \in R}$  определяются из системы линейных уравнений [4]:

$$\left. \begin{aligned} \partial \varphi(Af) / \partial \alpha_{r0 \cup n} &= 0, r \in R \\ \partial \varphi(Af) / \partial \beta_{1,20 \cup n} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

После обработки данных регистрации температур рабочей поверхности мундштука во время четырех туров прессования по методике (9), (10) было установлено, что относительная погрешность не превышает 0,7–0,8 %, если ограничиться третьими гармоническими в базисе (8). Поэтому размерность вектора  $\{\alpha_r\}_{r \in R}$  равна пяти, и объем исходной информации, необходимой для расчета управляющих воздействий, сокращается на порядок.

На основании расчетов по методике (3)–(6) проводился численный расчет для определения оптимальных температурных заданий релейного закона управления режимами электрообогрева мундштука в процессе прессования заготовок подовых блоков (из массы с удельным содержанием графита, равным 70 %). Вектор приближенных значений оптимальных температурных заданий устанавливался методом упорядоченного перебора [4] по критерию минимальной амплитуды температурных колебаний рабочих поверхностей калибра и захода. Ширина интервала варьирования температур в контрольных точках под индукторами калибра и захода задавалась равной 40°C, а шаг перебора последовательно уменьшался с 20°C до 2°C. Высокая вычислительная производительность методики (3)–(10) позволила синхронизировать численный расчет с опытно-

промышленным туром прессования и согласовать расчетные результаты с экспериментальными данными измерений в интерактивном режиме. Удалось устранить влияние погрешности, обусловленной неточным описанием теплофизических характеристик мундштука и угольно-графитовой массы, условий теплообмена на границах сопряжения индукторов с мундштуком и рабочей поверхности мундштука с прессуемой массой. Результаты экспериментальной проверки оптимальных температурных заданий для управления индукторами калибра и захода представлены на рис. 1.

Установлено, что в процессе прессования заготовок подовых блоков (из массы с 70 % удельным содержанием графита) при температурных заданиях управления индуктором калибра, равных  $t_{к.т(1,0)_{max}} = 180^0 C$

и  $t_{к.т(1,0)_{min}} = 178^0 C$ , были достигнуты наилучшие результаты по амплитуде температурных колебаний.

Изменение температуры контрольной точки под индуктором не превысило  $\Delta t_{к.т(1,0)} = 0,5^0 C$  – при прессовании из первой загрузки массного цилиндра (рис. 1, а) и

$\Delta t_{к.т(1,0)} = 2,5^0 C$  – при прессовании из второй загрузки (рис. 1, б). Для температурных заданий релейного управления индуктором захода, равных

$t_{к.т(1,n)_{max}} = 142^0 C$  и  $t_{к.т(1,n)_{min}} = 140^0 C$ , амплитуда температурных колебаний снизилась до:

$\Delta t_{к.т(1,n)} = 4^0 C$  и  $\Delta t_{к.т(1,n)} = 2^0 C$  – соответственно для первой и второй загрузок массы.

Оптимизация температурных заданий для автоматического регулирования электрообогрева мундштука при прессовании заготовок подовых блоков позволила сократить диапазон температур рабочей поверхности калибра мундштука до 3–4°C (рис. 1) при среднем значении температуры, равном 148–148,5°C. При этом диапазон температур рабочей поверхности захода мундштука уменьшился до 0,5–1°C при средних значениях этой температуры, равных 147°C и 143,5°C, для первой и второй загрузок массы соответственно.

Предложенная оптимизация температурных заданий не только улучшила качество управления режимами электрообогрева мундштука, но и обеспечила стабилизацию распределения температур по поверхности заготовок подовых блоков. При прессовании заготовок из первой загрузки массы в массный цилиндр температура их поверхности последовательно уменьшалась на 5–7°C ( $\Delta t \leq [\Delta t] = 8^0 C$ ): с 136°C до 129°C – для начала и с 132°C до 127°C – для конца каждой заготовки (рис. 1, а). При прессовании заготовок из массы второй загрузки температурная стабильность поверхности заготовок подовых блоков улучшилась на 1–2°C (рис. 1, б). Перепад температур их поверхности по длине заготовок не превысил 2–4°C, что оказало положительное влияние на качество готовой продукции.

Снижение температурного задания релейного управления для индуктора захода на 38°C по отношению к температурному заданию релейного управле-

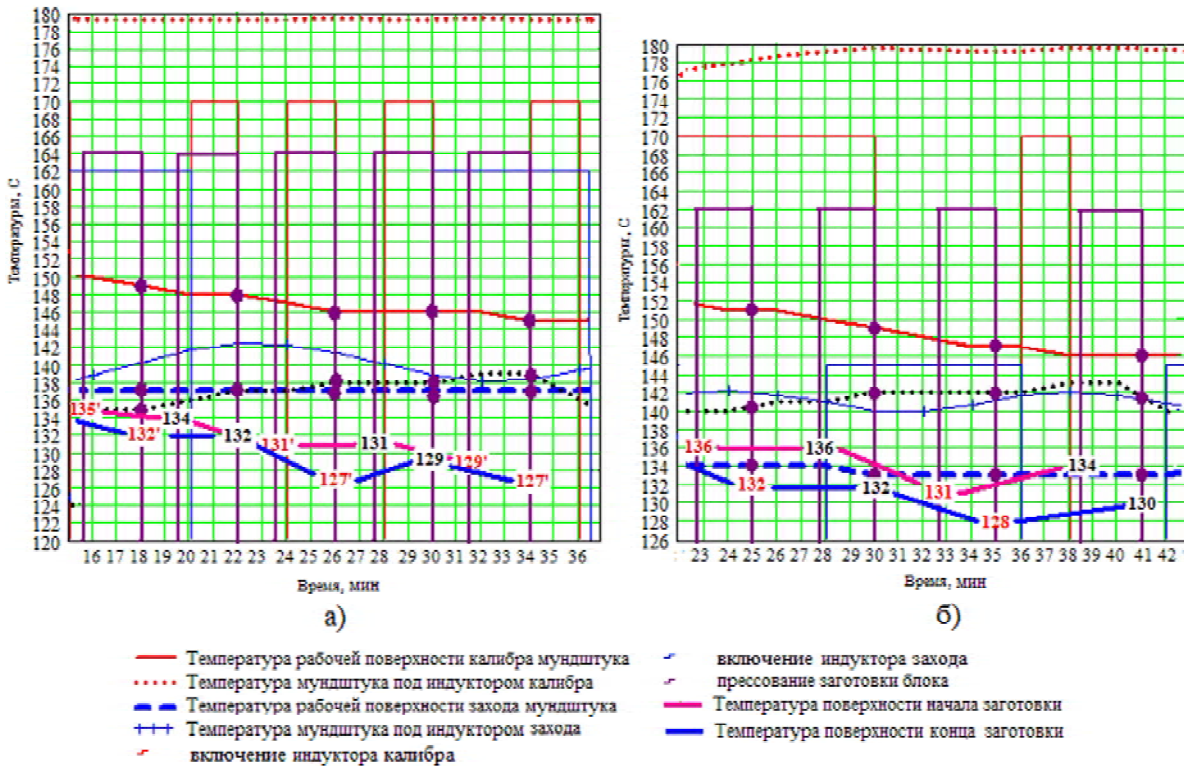


Рис. 1. Температурные режимы электрообогрева при прессовании заготовок подовых блоков (а – первая загрузка массы в массный цилиндр, б – вторая загрузка массы в массный цилиндр)

ния для индуктора калибра позволило уменьшить затраты электроэнергии на обогрев мундштука, так как суммарная продолжительность работы индуктора захода сократилась в 1,5–2 раза. Кроме того, более низкий уровень температурного задания позволяет сократить тепловые потери в окружающую среду и, следовательно, улучшить показатели энергоэффективности при производстве заготовок новых типов подовых блоков с увеличенным содержанием графита.

### Выводы

1. Предложенная новая методика преобразования математической модели теплопередачи в мундштуке прессы в систему обыкновенных дифференциальных уравнений для узловых температур в поперечных сечениях мундштука (5)–(10) обеспечивает высокую эффективность ее последующей численной реализации.

2. С использованием метода упорядоченного перебора установлены оптимальные значения температурных заданий для релейного закона регулирования, обеспечившие стабилизацию температур как в объеме мундштука, так и по поверхности заготовок подовых блоков.

3. Снижение уровня температурных заданий позволяет сократить длительность работы индуктора захода, уменьшить энергозатраты и стабилизировать температурное поле мундштука прессы и поверхнос-

ти заготовки. В частности, снижение уровня температурных заданий при управлении индуктором захода на 38°C позволяет сократить продолжительность работы индуктора захода в 1,5–2 раза и обеспечивает соответствующее снижение расхода электроэнергии на тур прессования.

### Перечень ссылок

1. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Ярымбаш Д. С., Тютюнник О. В., Загрудный О. Л. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы – мундштук» на подготовительном этапе тура прессования // Электротехника и электроэнергетика. – 2006. – № 1. – С. 56–60.
3. Андриенко П. Д., Ярымбаш Д. С. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 66. – С. 291–293.
4. Математика и САПР. Кн. 2. Вычислительные методы. Геометрические методы. /Под ред. Волкова Н.Г. – М.: Мир, 1989. – 260 с.

Поступила в редакцию 20.11.06 г.

После доработки 21.11.06 г.

*Запропонована методика оптимізації керування електричним обігрівом під час пресування заготовок подових блоків.*

*The method of the optimization of the electrical heating automatic control at the pulp pressing of the bottom graphite block is offered.*