

Экспериментальное исследование алгоритма. В исследовании обрабатывались данные, полученные со 100 коров в течение приблизительно 330 дней с датчиков измерения пяти параметров.

Результаты работы алгоритма оценивались по четырём критериям, часто применяемым при сопоставлении экспертных эталонных результатов поиска с алгоритмическими: полнота, точность, F -мера и ошибка идентификации отклонения (см. таблицу).

Таблица

Экспериментальная оценка алгоритма выявления всплесков, в %

Параметр	Полнота	Точность	F -мера	Ошибка
Среднесуточная активность животного	92,8	94,9	93,8	0,34
Вес животного	98,9	89,7	94,1	0,35
Электропроводность	98,0	93,5	95,7	0,26
Время доения	94,9	97,9	96,4	0,23
Ежедневный надой	94,7	98,2	96,5	0,23

Полнота характеризует способность системы находить критические отклонения параметра без учета тех, которые система найти не смогла. Точность работы алгоритма показывает способность находить такое же число отклонений, которое указал эксперт. F -мера является гармоническим средним полноты и точности. Ошибка отображает долю неправильно классифицированных алгоритмов.

Выводы.

В работе получен новый алгоритм идентификации внеплановых всплесков значений параметров производственных данных животноводческого предприятия, основанный на применении правила трех сигм по отношению к разности исходного и аппроксимированного временных рядов. Результаты работы

алгоритма по всем рассматриваемым критериям превосходят существующие. Процент ошибки определения периодов отклонения от нормы составляет менее одного, что в значительной степени ниже показателей систем-аналогов. Численная оценка полноты и точности работы алгоритма больше 90 % применительно ко всем параметрам исследования, что является высоким показателем для потенциального внедрения на предприятие.

Литература

1. Антонов, Л. В. Автоматизация процесса мониторинга животноводческого предприятия на основе исследования временных рядов параметров крупного рогатого скота / Л. В. Антонов, А. Д. Варламов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/113-10922> (дата обращения: 27.11.2013).
2. Антонов, Л. В. Алгоритм мониторинга критических изменений параметров производственного процесса животноводческого предприятия / Л. В. Антонов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2014. – №29.
3. Антонов, Л. В. Обзор и анализ современных информационных решений автоматизации животноводческих хозяйств / Л. В. Антонов, А. А. Орлов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/113-10943> (дата обращения: 29.11.2013).
4. Антонов, Л. В. Разработка адаптивного алгоритма отслеживания отклонений параметров животных в системе управления животноводческим предприятием / Л. В. Антонов, А. Д. Варламов, А. А. Орлов // Динамика сложных систем. – 2015. – №2. – С. 44–49.
5. Bulman, D. C. Milk progesterone levels in relation to conception, repeat breeding and factors influencing acyclicity in dairy cows. J. Reprod / D. C. Bulman, G. E. Lamming // Fertil. – 1978. – V. 54. – P. 447–458.
6. Lovendahl, P. Assessment of fertility in dairy cows based on electronic monitoring of their physical activity / P. Lovendahl, M. Chagunda // Proceedings of the 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Belo Horizonte, MG, Brazil. – 2006. – P. 496–500.

УДК 536.24

Ю. Р. Осипов
Вологодский государственный университет,
С. Ю. Осипов
Тверской государственный технический университет,
С. А. Шлыков
Вологодский институт права и экономики ФСИН России

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Исследованы температурные режимы процесса восстановления гуммировочных покрытий с целью повышения их качества. Процесс протекает в условиях действующих возмущений стохастической природы, которые являются факторами неопределенности и влияют на ход вулканизации. Создана математическая модель тепловых режимов вулканизации. Стохастическая задача решена с применением вероятностных критериев. Построены кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия, полученные экспериментальным путем и при решении вероятностной задачи по предложенной математической модели.

Теплообмен, температура, гуммировочное покрытие, стохастическая задача, неопределенность, вероятность, случайная величина.

The temperature cycle of the recovery process of rubber protective coatings is analysed to improve their quality. The process takes place in conditions of stochastic perturbation. They introduce uncertainty and may significantly affect the course of the process. A mathematical model for temperature cycle was developed. Stochastic problem is solved with the use of probabilistic criteria. As a result, the kinetic curves are constructed for the heating cycle of the rubber coating. The correlation was obtained experimentally and with the help of a mathematical model based on probability theory.

Heat transfer, temperature, rubberized coating, stochastic problem, uncertainty, probability, random variable.

Введение.

Для защиты металлических сооружений от воздействия внешних факторов на их поверхности наносят специальные защитные покрытия. Особая роль среди современных способов защиты химического оборудования от воздействий внешней среды отводится гуммировочным покрытиям. При их использовании достигается высокая долговечность, стойкость к воздействию различного рода агрессивных сред, высокая стойкость к эрозионному износу, неподверженность к воздействию микроорганизмов.

На предприятиях, использующих гуммированное оборудование, обычно отсутствует техническая возможность проводить полную реставрацию покрытий. Для исправления дефектов используют различные замазки и покрытия на полимерной основе. Эти материалы не обладают «сродством» к металлу из-за различия по химическому составу и структуре как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровнях. Особое значение имеют обеспечение адгезии наносимых материалов к металлу и сохранность ее в течение длительного времени.

Основная часть.

Результаты исследований [1], [3], [5] позволили выявить связь физико-химических характеристик гуммировочных смесей, которые в значительной мере определяют срок службы отремонтированного участка покрытия, т. е. искомого показателя качества, и температурные режимы процесса вулканизации.

Процесс вулканизации относится к классу сложных химико-технологических процессов и протекает в условиях постоянно действующих возмущений стохастической природы, которые являются источниками или факторами неопределенности и существенно влияют на ход технологического процесса вулканизации. В связи с тем, что оптимальная стратегия интенсификации процесса вулканизации не инвариантна вариациям возмущающих воздействий, для обеспечения заданного качества вулканизации учитываются факторы неопределенности. Задача интенсификации данным процессом заключается в повышении качества ремонта при минимуме энергетических затрат, определяется температурным режимом его проведения [1]–[3].

Проблема синтеза в стохастической системе состоит в определении алгоритма или закона управления объектом, обеспечивающего оптимальное протекание процесса или получение наилучшего конечного результата в заданных условиях с учетом случайных полезных воздействий. Эти стохастические за-

дачи решаются с применением вероятностных критериев.

При работе с вероятностью исходная стохастическая задача заменяется эквивалентной детерминированной минимаксной задачей [5]. Таким образом, задача интенсификации процесса термообработки эластомерных покрытий заключается в следующем: необходимо определить законы изменения токов нагревательных элементов плит, при которых достигается минимум математического ожидания суммы квадратов отклонений в «характерных» точках нагревательных плит при ограничениях на мощность и конструктивные параметры нагревательных элементов. Решение задачи с ограничениями затруднительно [5], поэтому системе уравнений математической модели ставится в соответствие система обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная путем дискретизации уравнений математической модели по пространственным координатам (6 точек разбиения) с использованием интерполяционных формул Лагранжа [4]. Результаты оценки адекватности модели доказали ее пригодность для процесса термообработки.

В результате моделирования получим:

$$\dot{x}(\tau) = f(\tau, x, u, a, b), \quad \tau_0 \leq \tau \leq \tau_1, \quad (1)$$

$\dim(x)=n, \dim(u)=m, \dim(b)=r, u(\tau)=\{I_1(t), I_2(t)\}$ – вектор управляющих воздействий;

$$I_1(t) \equiv u_1(t), I_3(t) \equiv u_3(t), \underline{u}_1 \leq u_1 \leq \bar{u}_1, \underline{u}_3 \leq u_3 \leq \bar{u}_3.$$

Критерий оптимальности с соответствующими начальными условиями: $x(\tau)|_{\tau=0} = x_0 + \xi_0$:

$$I_0(v) = M[f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \rightarrow \min_v, \\ f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1)) = \sum_{i=1}^{10} (x_i(\tau_1) - x'_i(\tau_1))^2, v = \{u, a\}, \quad (2)$$

где $x_i = 1, 10, x'_i = 1, 10$ – соответственно расчетная и измеряемая в «характерных» точках температура, при условиях связи, представленных в виде уравнения теплопроводности при ограничениях на управляющие воздействия:

$$\bar{\rho} \frac{l_1}{S_1} - R_{01} \leq 0, \quad \bar{\rho} \frac{l_3}{S_3} - R_{03} \leq 0$$

и на мощность нагревателя $Q_1 - N_{01} \leq 0, Q_3 - N_{03} \leq 0$.

Для решения задачи воспользуемся методами оптимизации систем со случайными параметрами [4]. При этом задача (1, 2) может быть формализована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 I_0(v) &= M[f_0(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \rightarrow \min, \\
 \dot{x} &= f(\tau, x, u, a, b), \tau \in [\tau_0, \tau_1], \quad x(\tau_0) = x_0, \\
 I_s(v) &= M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))] \leq 0, \quad s \in J_1 = 1, q, \\
 \Psi_s(u) &\leq 0, \quad s \in J_2 = 1, k, \\
 g_s(a) &\leq 0, \quad s \in J_3 = 1, q_0,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где

$$\Psi_s(u) = \begin{cases} u_1 - \bar{u}_1, \\ \underline{u}_1 - u_1, \\ u_3 - \bar{u}_3, \\ \underline{u}_3 - u_3, \\ Q_1 - N_{01}, \\ Q_3 - N_{03}. \end{cases} \quad g_s(a) = \begin{cases} -\frac{I_1}{S_1} - R_{01}, \\ -\frac{I_3}{S_3} - R_{03}. \end{cases}$$

$I_s(v)$, $s = 1, \dots, q$ – часть компонентов вектора фазовых координат, не используемых в (2).

Представим в таблице итерационный алгоритм поиска оптимального решения по шагам.

Таблица

Итерационный алгоритм поиска

№ шага	Выполняемые действия
1	Определение исходного управления $u^n(\tau)$, a^n , $p^n(n = 0, 1, 2, \dots)$, выбор σ, θ
2	Решение задачи Коши с имеющимся исходным приближением
3	Определение исходного приближения $xn1$, вычисление $M[f_s(x, x')]$, $\Psi_s(u)$, $g_s(a) \forall \tau \in [\tau_0, \tau_1]$
4	Формирование множество индексов $J_1(v^n)$, $J_2(u^n)$, $J_3(a^n)$ и $J(v^n, \varepsilon^n)$
5	Определение конуса возможных вариаций
6	Выбор допустимых вариаций δu_p^n , δa_i^n
7	Определение $\Delta I^0 = I^0(u^{n+1}) - I^0(u^n)$, $\Delta H = M[H(u^{n+1}) - H(u^n)]$
8	Оценка ΔI_0 , ΔH , если $ \Delta I_0 \leq \varepsilon_0$, $ \Delta H \leq \varepsilon_0$, $J(v^n, \varepsilon^n) = J(v^n)$ – прекращение процесса; иначе переход к п.2 с новым приближением $u^{n+1}(\tau)$, a^{n+1}

Задача Коши для уравнения (1), согласно п. 2 и 3 таблицы решается с приближением u^n , a^n . Определяется исходное приближение $xn1$, и вычисляются значения $M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))]$ и функций $\Psi_s(u)$, $g_s(a)$ при каждом фиксированном $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$. Далее формируются индексы:

$$\begin{aligned}
 J_1(v^n) &= \{s \in J_1 : M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))] = 0\}, \\
 J_2(u^n) &= \{s \in J_2 : \Psi_s[u(\tau)] = 0, \tau \in \tau_s^*\}, \\
 J_3(a^n) &= \{s \in J_3 : g_s(a) = 0\},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 J(v^n, \varepsilon^n) &\cup J_1(v^n, \varepsilon^n) \cup J_2(u^n, \varepsilon^n) \cup J_3(a^n, \varepsilon^n): \\
 J_1(v^n, \varepsilon^n) &= \{s \in J_1 : -\varepsilon^n \leq M[f_s(x, x')] \leq 0\},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_2(u^n, \varepsilon^n) &= \{s \in J_2 : -\varepsilon^n \leq \Psi_s[u(\tau)] \leq 0, \tau \in \tau_s^*\}, \\
 J_3(a^n, \varepsilon^n) &= \{s \in J_3 : -\varepsilon^n \leq g_s(a) \leq 0\}, \\
 \tau_s^* &= \{\tau \in [\tau_0, \tau_1] : \Psi_s[u(\tau)] = 0\}, \\
 \tau_s^{**} &= \{\tau \in [\tau_0, \tau_1] : -\varepsilon^n \leq \Psi_s[u(\tau)] \leq 0\},
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где $J_1 = \{1, 2\}$, $J_2 = \{1, 4\}$, $J_3 = \{1, 2\}$, $\tau_s^* \subset \tau_s^{**}$, множества $J(v^n) = J(v^n, \varepsilon^n)$, совпадают при $\varepsilon_n = 0$, если $\tau_s^* = \tau_s^{**}$, где ε – параметры, вводимые для обеспечения сходимости итерационного алгоритма.

Согласно методу возможных направлений [4], введем искусственную переменную σ , вектор с положительными компонентами θ , и определим конус возможных вариаций:

$$\begin{aligned}
 K_0 &= \{\delta u^n, \delta a^n\} - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \\
 &+ \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma_n \leq 0, \\
 &s \in J_1(v^n, \varepsilon^n),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u} \delta u_p^n + \theta_s \sigma^n &\leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\
 \sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a} \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n &\leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n).
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Выберем из всех допустимых вариаций δu_p^n , δa_i^n , удовлетворяющих (6), вариации, имеющие наибольшую скорость убывания функционала (2). Вводя нормализацию $\|\delta u_p^n\| \leq 1$, $\|\delta a_i^n\| \leq 1$, приходим к необходимости решения задачи вида:

$$\begin{aligned}
 \max &\left\{ \sigma^n - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \right. \\
 &+ \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_1(v^n, \varepsilon^n), \\
 &\sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \delta u_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\
 &\sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n), \\
 &- \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \\
 &+ \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \sigma^n \leq 0 \},
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где $H = \sum_{i=1}^n \Lambda_i(\tau) \varphi_i(\tau, x, u, a, b)$; $\Lambda_i(\tau) \neq 0$ непрерывные случайные функции:

$$\dot{\Lambda}_i = -\frac{\partial H^s}{\partial x_i}, \tau \in [\tau_1, \tau_0], \Lambda_i(\tau_1) = -\frac{\partial f_s}{\partial x_{i1}}, s = 0, \dots, q.$$

Произвольный вектор $(\delta u_p^n, \delta a_i^n, \sigma^n)$, удовлетворяющий (7), при $\sigma \geq 0$ определяет возможные подходы вариации, так как

$$\begin{aligned} K = \{ & \delta u^n, \delta a^n \} - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \\ & + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, \\ & s \in J_1(v^n, \varepsilon^n), \\ & \sum_{p=1}^r \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \delta u_p^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\ & \sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_p^n \leq -\theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n). \end{aligned} \quad (8)$$

– есть конус возможных вариаций [4],

$$\begin{aligned} \delta I_0 = & - \sum_{p=1}^r M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \delta u_p^n d\tau + \\ & + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_0}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n \leq -\sigma^n \leq 0. \end{aligned}$$

За счет максимизации σ^n выбираются такие подходящие вариации $\delta u^n, \delta a^n$ в направлении которых функционал (2) убывает, а функция $M[H(\tau, x, u, a, b, \Lambda)]$ переменного u почти для всех $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$ возрастает достаточно быстро. Основное значение нормализации – это обеспечение единственности решения вспомогательной задачи выбора подходящих вариаций. В направлении наискорейшего спуска $\delta u_p^n = \alpha_p^n \left(\frac{\partial H^0}{\partial a_i} \right)$ задача о выборе возможных вариаций (7) сводится к отысканию конечномерного вектора $(\alpha_p, \delta a_p)$, обеспечивающего:

$$\begin{aligned} \max \{ & \delta u^n - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \} \alpha_p^n + \\ & + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^s}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_1(v^n, \varepsilon^n), \\ & \sum_{p=1}^r \left[M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) \frac{\partial \Psi_s}{\partial u_p} \right] \alpha_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_2(u^n, \varepsilon^n), \\ & \sum_{i=1}^{m_0} \frac{\partial g_s}{\partial a_p} \delta a_p^n + \theta_s \sigma^n \leq 0, \quad s \in J_3(a^n, \varepsilon^n), \\ & - \sum_{p=1}^r \int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^s}{\partial u_p} \frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \} \alpha_p^n + \\ & + \sum_{i=1}^{m_0} M \left(\frac{\partial f_s}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n + \sigma^n \leq 0, \sigma^n \geq 0 \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь коэффициенты при неизвестных α_p^n – известные величины, вычисляемые при u^n, a^n, p^n вдоль n -х траекторий по формулам:

$$\dot{\Lambda}_i^s = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \tau \in [\tau_1, \tau_0], \Lambda_i^s(\tau_1) = -\frac{\partial f_s}{\partial x_{i1}}, s = 0, \dots, q. \quad (10)$$

Случайные величины и вектор-функции, входящие в правые части (9), (10), моделируются по их заданным вероятностным характеристикам. Для каждой выборки значений случайных векторов и вектор-функций при помощи численных методов интегрируется (10), численное интегрирование проводится многократно [3].

Выбор подходящих вариаций (9) является задачей линейного программирования с двухсторонними ограничениями на переменные. При ее решении возникают затруднения, связанные с тем, что задача (8) имеет бесконечное число ограничений. Чтобы преодолеть эту трудность, интервал времени $[\tau_0, \tau_1]$ покрывается счетной сеткой с шагом τ , и улучшение управляющей функции производится при каждом фиксированном $\tau_v \in [\tau_0, \tau_1]$. Величина шага h^n , на который следует сместиться в направлении подходящих вариаций $\delta u^n, \delta a^n$, вычисляется как наименьший, положительный корень уравнений:

$$\begin{aligned} \delta I_0 = & \sum_{p=1}^r \left[\int_{\tau_0}^{\tau_1} M \left(\frac{\partial H^0}{\partial u_p} \right) d\tau \right] \alpha_p^n + \\ & + \sum_{i=1}^{m_0} \left(\frac{\partial f_0}{\partial a_i} - \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\partial H^0}{\partial a_i} d\tau \right) \delta a_i^n = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M[f_s(x(\tau_1), x'(\tau_1))] &= 0 \quad (s \in J_1), \\ \Psi_s(u) &= 0 \quad (s \in J_2), \quad g_s(a) = 0 \quad (s \in J_3). \end{aligned} \quad (12)$$

Частные производные и функции вычисляются в точке $(u^n(\tau) + h^n \delta u^n(\tau)|_{\tau=\tau^n}, a^n + h^n \delta a^n)$; h^n – единственная переменная; $u^n(\tau), a^n, \delta u^n, \delta a^n$ – известные векторы; $\tau^n = \cup_s \tau_s$. Если какое-либо из уравнений (12) не имеет положительных корней, то его наименьший положительный корень полагается равным ∞ .

Согласно п. 8 таблицы производим оценку $\Delta I_0, \Delta H$.

Если $|\Delta I_0| < \varepsilon_0, |\Delta H| < \varepsilon_0, J(v^n, \varepsilon^n) = J(v^n)$, то итерационный процесс прекращается. В противном случае переходим к п. 1 таблицы и продолжаем вычисления с новым приближением

$$u^{n+1}(\tau) = u^n(\tau) + h^n \delta u^n(\tau)|_{\tau=\tau^n}, \quad a^{n+1} = a^n + h^n \delta a^n.$$

Таким образом, метод возможных направлений предусматривает выбор начального приближения, выбор подходящих вариаций, в направлении кото-

рых функционал $I_0(v)$ убывает, а функция $M[H]$ перемещенного и почти для всех $t \in [t_0, t_1]$ возрастает достаточно быстро, обеспечивая условия сходимости процесса к оптимальному решению.

Результаты решения задач интенсификации для марки ремонтируемого покрытия 1751 (1,5) + 1976 (1,5+1,5) [1] представлены на рисунке, где показаны законы изменения токов нагревательных элементов плит, и изменение во времени средней по поверхности температуры вулканизируемого участка ремонтируемого покрытия.

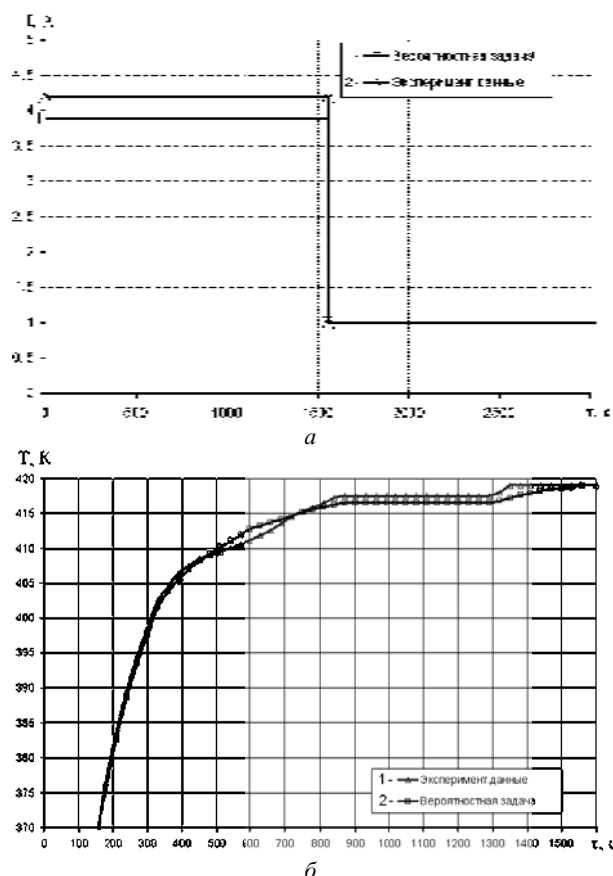


Рисунок. Кинетические кривые теплового режима прогрева покрытия марки 1751 (1,5) + 1976 (1,5 + 1,5) при $\delta_{ст} = 2$ мм., до и по результатам решения вероятностной задачи

Кривая 1 описывает изменения средней по поверхности температуры при эксперименте, по ре-

зультатам реализации детерминированной задачи процесса вулканизации; кривая 2 характеризует изменение температуры, полученное при решении вероятностной задачи.

На рисунке (а) представлено управляющее воздействие процессом вулканизации при ремонте покрытия марки 1751 (1,5) + 2566 (1,5 + 1,5 + 1,5) при $\delta_{ст} = 4$ мм, которое представляет собой кусочно-постоянную функцию. График имеет две ярко выраженные площадки (основной нагрев и остывание в индукторе), что не противоречит физико-химическим основам процесса вулканизации. Первая площадка, находящаяся на уровне 4,2 А, имеет продолжительность 2400 с. и соответствует процессу разогрева, вторая соответствует процессу выдержки.

Выводы.

Введение в математическую модель формализованных возмущений стохастической природы позволяет существенно снижать максимальные значения токов (до 5–7 %) и, как следствие, обеспечивать меньшие затраты электроэнергии. Диапазон разброса температур, возникающих при реализации найденных законов, соответствует технологическим условиям [3] и находится в пределах 5К.

Характерной особенностью найденных законов является разная высота площадок по отношению к найденным законам процесса ремонта покрытий, что объясняется толщиной нагреваемых участков ремонтируемых покрытий.

Литература

1. Кафаров, В. В. Оптимизация теплообменных процессов и систем / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Л. В. Гурьев. – М., 1988.
2. Кафаров, В. В. Развитие идей перспективного стохастического программирования для задач химической технологии / В. В. Кафаров, В. И. Бодров, В. Г. Матвейкин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308. – №4. – С. 918–921.
3. Осипов, Ю. Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов / Ю. Р. Осипов. – М., 1995.
4. Ректорис, К. Вариационные методы в математике, физике и технике / К. Ректорис; под ред. К. И. Бабенко, Б. Е. Победри. – М., 1985.
5. Юдин, Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д. Б. Юдин. – М., 1979.

В. В. Плашенко

Череповецкий государственный университет,

В. Л. Тамп, Н. В. Тамп

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ, ОТРАЖАЮЩИХ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В статье приведен вариант классификации сложных систем, обосновано, что информационно-вычислительная сеть является сложной, динамической, стохастической системой. Представлена модель, основанная на рекуррентном соотношении, позволяющем формировать двумерный вектор состояния исследуемой сети с учетом заданной матрицы переходных вероят-