



Введём в рассмотрение бинарное отношение  $\gamma$  на  $\widetilde{P}_3$  как

$$\bar{\gamma} = \{(1, 0), (1, X), (1, 1'), (X, 0), (0', 0)\}$$

и распространим его покомпонентно на векторы с компонентами в  $\widetilde{P}_3$ , в том числе на элементы полурешётки состояний. Пусть далее для элементного базиса  $B$  через  $x_B$  обозначается вектор значений функций всех элементов из  $B$  на их аргументе  $x$ .

**Теорема 2.** Пусть множество переходов  $T$  совместимо для функции  $f$  и RS-базис  $B$  содержит элемент, не сохраняющий отношения  $\gamma$ . Тогда  $f$  реализуется функционально устойчивой к состязаниям на всех переходах из множества  $T$  схемой в базисе  $B$ , если и только если для любого  $y \in M = \bigcup_{x \in U_{f_T}} m(x_B)$  существует нижняя грань множества  $T_y = \{f_T(x) : x \in U_{f_T} \& y \in m(x_B)\}$ .

**Доказательство.** По теореме 1 доказываемое утверждение равносильно реализуемости в базисе  $B$  расширения  $f_T$ . В свою очередь, в условиях теоремы необходимым и достаточным условием реализуемости  $f_T$  в базисе  $B$  является квазимонотонность отношения  $\Gamma_{f_t, B}$ , которое содержит пары  $(x_B, f_T(x))$  для всех  $x \in U_{f_T}$  [8, теорема 3]. Пусть отношение  $\Gamma_{f_t, B}$  квазимонотонно. Тогда поскольку для любого  $y \in M$  существует нижняя грань множества  $\{x_B : y \in m(x_B)\}$  (например,  $y$ ), то по тесту квазимонотонности [1] существует и нижняя грань множества  $T_y$ . Необходимость доказана.

Достаточность. Построим функцию  $h : M \rightarrow L$ , положив  $h(y) = \inf T_y$  для каждого  $y \in M$ , и ее расширение  $g$  по правилу точечного продолжения [1]:  $g(a) = \sum_{t \in m(a)} g(t)$ . Согласно [1, теорема 3.2], функция  $g$  является монотонной. Рассмотрим произвольное значение  $x \in U_{f_T}$ . Имеем:  $g(x_B) = \sum_{y \in m(x_B)} g(y) = \sum_{y \in m(x_B)} h(y) \leq f_T(x)$ , что означает  $g \leq \Gamma_{f_t, B}$ . Следовательно, отношение  $\Gamma_{f_t, B}$  квазимонотонно, и  $f_T$  реализуется в базисе  $B$ . Теорема доказана.

#### Библиографический список

1. Агibalов Г.П. Дискретные автоматы на полурешетках. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1993.
2. Eichelberger E.B. Hazard Detection in Combinational and Sequential Switching Circuits // IBM Journal of Research and Development. 1965. V. 9, № 2. P. 90–99.
3. Миллер Р. Теория переключательных схем. М.: Наука, 1971. Т. 2.
4. Яблонский С.В. Основные понятия кибернетики // Проблемы кибернетики. М.: Наука, 1959. Вып.2. С. 7–38.
5. Рогинский В.Н. Основы дискретной автоматики. М.: Связь, 1975.
6. Чеботарев А.Н. Риск в асинхронных логических схемах // Кибернетика. 1976. № 4. С. 8–11.
7. Агibalов Г.П., Комаров Ю.М., Липский В.Б. Синтез комбинационных схем, свободных от статических состязаний // Автоматика и вычислительная техника. 1979. № 1. С. 1–6.
8. Панкратова И.А. Условия реализуемости функций на полурешётке в реальных базисах переключательных элементов // Дискретный анализ и исследование операций. Сер. 1. 2006. Т. 13, № 3. С. 40–61.

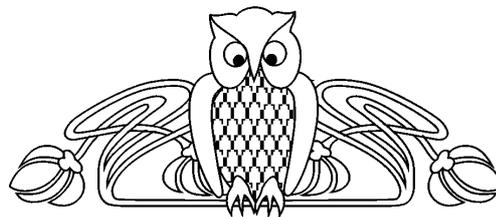
УДК 681.5:51-74

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛОБМЕНА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.В. Шуба

Институт прикладной математики и механики НАНУ, Украина  
E-mail: tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua,  
ivanova@iamm.ac.donetsk.ua

Предложены методы и алгоритмы идентификации параметров внешнего теплообмена на основе метода наименьших квадратов. Проведён сравнительный анализ методов идентификации распределенных параметров.



Methods and Algorithms of Identification of External Heat Exchange Parameters for Heat and Mass Transfer Processes

V.N. Tkachenko, A.A. Ivanova, O.V. Shuba

The methods and algorithms of identification of external heat exchange parameters based on least square method are proposed. The comparative analysis of distributed parameters identification methods is performed.



## ВВЕДЕНИЕ

Трудность практического использования математических моделей связана с отсутствием необходимых значений (физических констант или зависимостей) для коэффициентов уравнений модели. В связи с этим возникает задача идентификации параметров модели. Высокие требования к точности моделей вынуждают рассматривать неизвестные величины параметров распределенными в пространстве либо во времени. Одним из примеров может служить процесс тепломассопереноса в слитке, движущемся внутри машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), математическая модель которого разработана в работе [1].

## 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОБМЕНА МНЛЗ

Рассмотрим некоторый участок непрерывно движущегося стального слитка в системе координат привязанной к конструкции машины непрерывного литья (рис. 1).

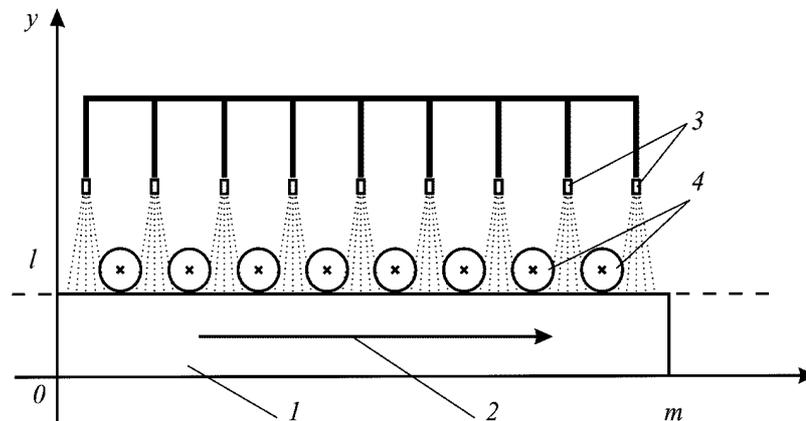


Рис. 1. Участок непрерывного слитка: 1 — слиток, 2 — направление движения слитка, 3 — форсунки, распыляющие охлаждающую водо-воздушную смесь, 4 — опорные и приводные ролики

Уравнение тепломассопереноса для двумерной модели в прямоугольнике  $(0, l) \times (0, m)$  выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T(\tau, x, y)}{\partial \tau} + v(\tau) \frac{\partial T(\tau, x, y)}{\partial x} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right\},$$

где  $v(\tau)$  — скорость движения среды,  $T(\tau, x, y)$  — температура,  $c(T)$  — удельная теплоёмкость,  $r(T)$  — плотность, и  $\lambda(T)$  — теплопроводность сплошной среды. Заданы начальные условия:

$$T(0, x, y) = T_0(x, y)$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=m} = 0, \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = \alpha(x) \cdot (T_{os} - T|_{y=l}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha(x)$  — коэффициент конвективной теплоотдачи,  $T$  — температура внутри слитка,  $T_{y=l}$  — температура на поверхности слитка,  $T_{os}$  — температура окружающей среды.

Требуется определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha(x)$ . В качестве дополнительной информации выступают данные измерений температуры на поверхности слитка.

Такие задачи называются граничными обратными задачами [2,3]. Они являются некорректными в классическом смысле. Чтобы получить представление о степени неустойчивости решения обратной



задачи, воспользуемся методом прямого обращения. Для этого из граничного условия (1) получим выражение для вычисления  $\alpha(x)$ :

$$\alpha_i = \frac{\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l}}{T_{os} - T_{i,N}}.$$

Для применения метода наименьших квадратов примем во внимание следующую информацию. Коэффициент  $\alpha(x)$  имеет специальное распределение вдоль поверхности слитка. Известно, что на участке, накрываемом факелом форсунки, его можно приблизить параболической функцией, которая приобретает максимальное значение в точке, соответствующей координате сопла форсунки, а на остальных участках — константой. Будем искать  $\alpha(x)$  в виде

$$\alpha(x) = \alpha_c - \frac{A}{h^2} x^2 + A.$$

Величина  $h$  определяется полушириной захвата факела форсунки. Следовательно, неизвестными являются всего два параметра —  $A$  и  $\alpha_c$ .

Рассмотрим сначала участки, на которых  $\alpha(x) = \alpha_c = \text{const}$ . Обозначим  $K$  — множество узлов  $x_i$ , в которых мы считаем КТ постоянным. Множество остальных узлов, где КТ распределяется согласно параболическому закону, обозначим  $B$ .

После проведения конечно-разностной аппроксимации получаем формулу для невязки тепловых потоков на границе:

$$\delta = \lambda_{i,N} P_{1_i} - \alpha_c P_{2_i},$$

где  $P_{1_i} = \lambda_{i,N} \frac{T_{i,N} - T_{i,N-1}}{q}$ ,  $P_{2_i} = T_{os} - T_{i,N}$ .

Требуется найти такое  $\alpha_c$ , чтобы сумма квадратов невязок была минимальной, т.е. чтобы выполнялось условие

$$S = \sum_i (P_{1_i} - \alpha_c P_{2_i})^2 \rightarrow \min, \quad \forall i: x_i \in K.$$

Из необходимого условия существования экстремума  $S(\alpha)$  находим  $\alpha_c$

$$\alpha_c = \frac{\sum_i P_{2_i} P_{1_i}}{\sum_i P_{2_i}^2}.$$

Каждому узлу  $x_i$  из множества  $B$  поставим в соответствие точку  $y_i$  на отрезке  $[-h, h]$  таким образом, чтобы  $|y_i|$  равнялось расстоянию от соответствующего  $x_i$  до координаты ближайшей форсунки. Аналогичным способом находим

$$A = \frac{\alpha_c \sum_i P_{2_i}^2 \left( \frac{y_i^2}{h^2} - 1 \right) - \sum_i P_{1_i} P_{2_i} \left( \frac{y_i^2}{h^2} - 1 \right)}{\sum_i P_{2_i}^2 \left( \frac{y_i^2}{h^2} - 1 \right)^2}.$$

Необходимо также отметить, что для определённых при помощи МНК значений  $\alpha_c$  и  $A$  выполняется достаточное условие существования минимума функции  $S$ . Легко проверить, что частные производные второго порядка  $S$  по каждому из этих параметров строго больше нуля.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Методом наименьших квадратов и методом прямого обращения были проведены численные расчёты. В качестве теплофизических параметров для модели были выбраны данные процесса непрерывной разливки стали (для марки ст 40), ширины сляба 1м, полутолщины сляба  $l = 0,1$ м и скорости движения слитка  $v = 1$ м/мин. Данные вычислений представлены на рис. 2. Здесь хорошо видно, что решение, полученное методом прямого обращения, является неустойчивым и непригодным для практического использования. Вторая кривая представляет сплайн аппроксимацию, которая является результатом решения той же задачи методом наименьших квадратов.

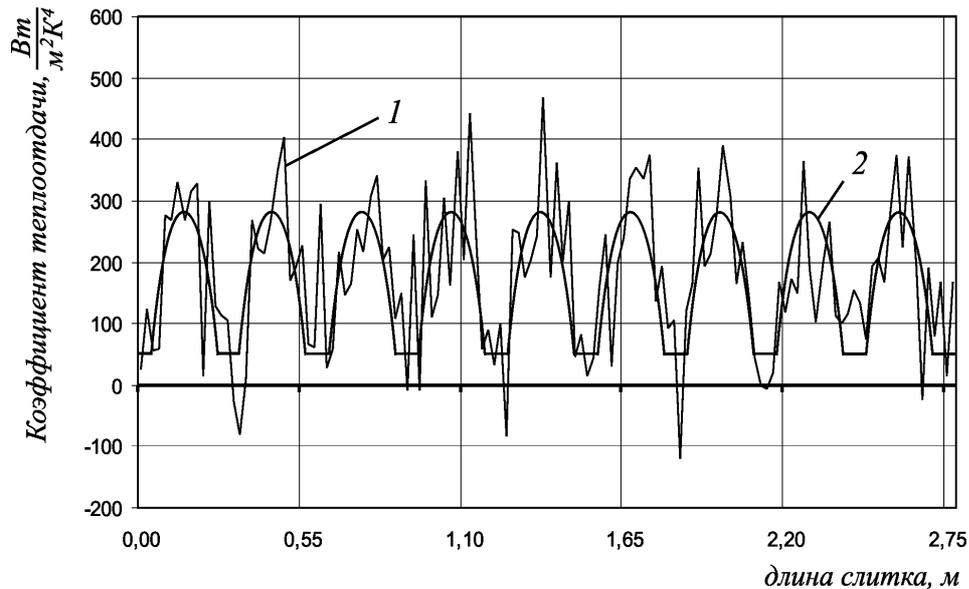


Рис. 2. Результаты определения коэффициента теплоотдачи: 1 — методом прямого обращения, 2 — методом наименьших квадратов

Таким образом, мы нашли сплайн-аппроксимацию распределённого в пространстве коэффициента теплоотдачи на поверхности движущегося слитка, которая даёт нам минимальное среднеквадратичное отклонение между температурой поверхности измеренной и вычисленной по модели в результате решения прямой задачи.

### 3. МЕТОД РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ТИХОНОВА

Метод регуляризации Тихонова позволяет получить устойчивое решение без жестких ограничений на вид функций, описывающих изменение коэффициентов теплообмена по длине зоны теплообмена. Распределение коэффициентов  $\alpha(x)$  отыскивается путем минимизации следующего регуляризирующего функционала:

$$I(\alpha) = \int_0^m [T_{\text{расч}}(x) - T_{\text{изм}}(x)]^2 dx + \beta \Omega[\alpha(x)],$$

где  $T_{\text{расч}}(x)$  — температура, получаемая в результате решения прямой задачи теплопроводности,  $T_{\text{изм}}(x)$  — измеряемая температура;  $\Omega[\alpha(x)]$  — стабилизирующий функционал;  $\beta$  — параметр регуляризации,  $\beta > 0$ .

Структурно регуляризирующий функционал состоит из двух функционалов, первый из которых оценивает величину невязки между измеренной и расчетной температурами, второй предназначен для стабилизации получаемого решения. Величина вклада стабилизирующего функционала определяется параметром регуляризации  $\beta$ , значение которого предлагается определять в соответствии с «принципом невязки». Величина  $\beta$  должна быть такова, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$\int_0^m [T_{\text{расч}}(x) - T_{\text{изм}}(x)]^2 dx = \delta^2,$$

где  $\delta^2$  — интегральная характеристика среднеквадратической погрешности измерений температур.

Предполагая  $p$ -кратную дифференцируемость искомых функций, можно предложить в качестве стабилизирующего функционала следующий функционал достаточно общего вида:

$$\Omega[\alpha(x)] = \int_0^m \sum_{i=1}^p \mu_i \left( \frac{\partial^i \alpha(x)}{\partial x^i} \right)^2 dx,$$



где  $\mu_i$  — весовые коэффициенты,  $i = 1, \dots, p$ ;  $p$  — порядок стабилизации функционала.

Задача определения параметров путем минимизации регуляризирующего функционала со стабилизирующим функционалом становится «условно корректно поставленной».

Недостатком метода регуляризации является большой объем вычислений, связанный с процедурой поиска нужного значения параметра регуляризации, а также с овражностью регуляризирующего функционала. Другой существенный недостаток метода связан с самой идеей регуляризации: сглаживания решения в пределах погрешности измерений. Чем больше погрешность, тем можно получить более гладкую кривую, но при этом возрастает опасность получения хотя и более плавной кривой, но все в большей степени отклоняющейся от истинной. В этом смысле метод регуляризации принципиально отличается от ряда методов, которые обеспечивают получение достаточно точного решения при росте погрешности в исходных данных. К таким методам относится, например, метод наименьших квадратов.

#### 4. МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПАРАМЕТРА

Наряду с регуляризацией Тихонова, для идентификации распределенных параметров модели теплофизического процесса предлагается применить идею метода наименьших квадратов (МНК).

Сформулируем обратную задачу нахождения коэффициентов конвективного теплообмена для одномерного уравнения теплопроводности с граничными условиями 3-го рода.

Для простоты изложения метода предполагаем нагрев симметричным, поэтому  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ . В этом случае минимальный объем необходимой для решения задачи информации соответствует измерению температуры тела в какой-либо одной точке одномерной области  $0 \leq x \leq l$ . Предположим, известна температура тела на границе с внешней средой:

$$T(\tau, 0) = f(\tau).$$

Задача состоит в нахождении  $\alpha = \alpha(\tau)$  как функции, зависящей от времени. Предполагая функцию  $\alpha(\tau)$  непрерывной, с целью аппроксимации искомой функции воспользуемся полиномом  $n$ -й степени

$$\alpha(\tau) = a_0 + a_1 \cdot \tau + \dots + a_n \cdot \tau^n,$$

степень полинома будет определяться по принципу невязки.

Решив задачу Дирихле методом конечных разностей, получим температуры  $T(\tau_i, x_j)$ , которые будут необходимы для вычисления производной в граничном условии

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(\tau) [T_{\text{гр.}}(\tau) - T(\tau, 0)],$$

в котором неизвестной является только величина конвективного теплообмена  $\alpha(\tau)$ .

После замены конечными разностями теплового потока получаем систему уравнений граничных условий в  $r$  моментах времени:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} (T(\tau_i, x_1) - T(\tau_i, x_0)) = \alpha_i [T_{\text{в}} - T(\tau_i, x_0)], \quad i = \overline{1, r},$$

где  $\alpha_k$  — значение полинома в момент времени  $k$  и  $\alpha_k = a_0 + a_1 \cdot k \cdot \Delta\tau + \dots + a_n k^n \Delta\tau^n$ ,  $k = \overline{1, r}$ ,  $r \gg n$ ; или в матричной форме

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\Delta x} \begin{pmatrix} T(\tau_1, x_1) - T(\tau_1, x_0) \\ T(\tau_2, x_1) - T(\tau_2, x_0) \\ \dots \\ T(\tau_r, x_1) - T(\tau_r, x_0) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \alpha_1 \cdot (T_{\text{о.с.}} - T(\tau_1, x_0)) \\ \alpha_2 \cdot (T_{\text{о.с.}} - T(\tau_2, x_0)) \\ \dots \\ \alpha_r \cdot (T_{\text{о.с.}} - T(\tau_r, x_0)) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{\text{о.с.}} - T(\tau_1, x_0) \\ T_{\text{о.с.}} - T(\tau_2, x_0) \\ \dots \\ T_{\text{о.с.}} - T(\tau_r, x_0) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$



Выделим компоненты неизвестных параметров полинома, представленного в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_r \end{pmatrix} = a_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} + a_1 \cdot \begin{pmatrix} 1\Delta\tau & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\Delta\tau & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r\Delta\tau \end{pmatrix} + \dots$$

$$\dots + a_n \cdot \begin{pmatrix} 1\Delta\tau^n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2^n\Delta\tau^n & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r^n\Delta\tau^n \end{pmatrix}.$$

Для удобства записи преобразований введем следующие обозначения:

$$A^i = \begin{pmatrix} 1\Delta\tau^i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2^i\Delta\tau^i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r^i\Delta\tau^i \end{pmatrix}, \quad P = \frac{\lambda}{\Delta x} \begin{pmatrix} T(\tau_1, x_1) - T(\tau_1, x_0) \\ T(\tau_2, x_1) - T(\tau_2, x_0) \\ \dots \\ T(\tau_r, x_1) - T(\tau_r, x_0) \end{pmatrix},$$

$$\tilde{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_r \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} T_{o.c.} - T(\tau_1, x_0) \\ T_{o.c.} - T(\tau_2, x_0) \\ \dots \\ T_{o.c.} - T(\tau_r, x_0) \end{pmatrix}.$$

$P_k$  и  $H_k$  —  $k$ -е элементы столбцов.

Тогда уравнение (2) в матричной форме будет иметь вид

$$P = \tilde{\alpha}H.$$

Для нахождения функции методом МНК введем меру отклонения в виде суммы квадратов разности измеренных температур от расчетных по модели

$$S(\alpha) = \sum_{k=1}^r (P_k - \alpha_k H_k)^2.$$

Используя введенные обозначения, параметр  $\alpha$  можно записать как  $\alpha(\tau) = a_0 \cdot A^0 + a_1 \cdot A^1 + \dots + a_n \cdot A^n$ , тогда функционал  $S(\alpha)$  будет иметь вид

$$S(\alpha) = \sum_{k=1}^r (P_k - \alpha_k H_k)^2 = (P - (a_0 \cdot A^0 + a_1 \cdot A^1 + \dots + a_n \cdot A^n) \cdot H)^T,$$

$$(P - (a_0 \cdot A^0 + a_1 \cdot A^1 + \dots + a_n \cdot A^n) \cdot H) = P^T P - 2 \sum_{k=0}^n a_k H^T A^k P + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j H^T A^{i+j} H.$$

Задача сводится к нахождению коэффициентов полинома, которые бы минимизировали функционал  $S(\alpha)$ . Пусть минимум достигается при  $\alpha' = \alpha(\tau')$ . Тогда для значений коэффициентов полинома должно быть выполнено условие

$$\frac{dS(\alpha')}{da_k} = 0, \quad k = \overline{0, n}; \quad (3)$$

Вычислим векторы первых производных суммы квадратов отклонений по компонентам  $a_0, a_1, \dots, a_n$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = \frac{\partial [(P - \alpha H)^T (P - \alpha H)]}{\partial a_i} = 2a_0 H^T A^i H + 2a_1 H^T A^{i+1} H + \dots + 2a_n H^T A^{i+n} H - 2H^T A^i P = 0,$$



Получили систему из  $n + 1$  линейных алгебраических уравнений с  $n + 1$  неизвестными

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^n a_k H^T A^k H = H^T A^0 P, \\ \sum_{k=0}^n a_k H^T A^{k+1} H = H^T A^1 P, \\ \dots \\ \sum_{k=0}^n a_k H^T A^{k+n} H = H^T A^n P. \end{cases}$$

Из линейной независимости строк следует, что детерминант не обращается в ноль, и решение системы единственное.

Легко убедиться, что уравнения (3) определяют минимум, так как матрица вторых производных (матрица Гессе) положительно полуопределена [4].

При выборе степени аппроксимирующего полинома повышение его степени целесообразно до такого значения, при котором отклонение измеренных температур от расчетных по модели остается больше погрешности измерений. В противном случае (при более высоких степенях) погрешность измерений прямо редуцируется в погрешность определения распределенного параметра по методу МНК. И метод теряет свои фильтрующие и стабилизирующие свойства.

### Библиографический список

1. Ткаченко В.Н., Иванова А.А. Анализ температурных полей криволинейной МНЛЗ на основе математического моделирования // Материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. «Прогресивні технології у металургії сталі: XXI сторіччя». Донецк: ДонНТУ, 2007. С. 242–249.
2. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. В 2 т. Т.2. Приложения. Киев: Наук. думка, 2003.
3. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Едиториал УРСС, 2004.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
5. Иванова А.А. Математическая модель процесса затвердевания непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения. // Труды ИПММ НАН Украины. Донецк: ИПММ, 2006. Вып.12. С. 76-84.
6. Ткаченко В.Н. Моделирование тепловых процессов в автоматизированных системах обработки информации // Вісник Донецького національного університету. Сер. А. Природничі науки. 2002. №2. С. 379–383.

УДК 519.713:681.3

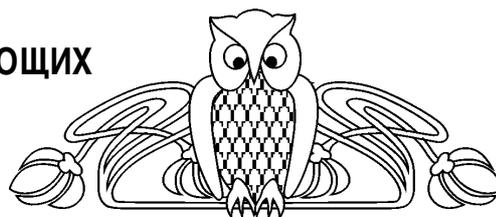
## СИНТЕЗ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОНТРОЛИРУЮЩИХ ТЕСТОВ ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО УСТРОЙСТВА

И.В. Уколов

Саратовский государственный университет,  
кафедра математической кибернетики и компьютерных наук  
E-mail: ukivan@yandex.ru

В статье рассматривается псевдослучайный метод построения контролирующих тестов для дискретных устройств, применимый как к комбинационным, так и к последовательностным устройствам. Используется энтропийный подход для отыскания оптимального распределения вероятностей входных наборов, что позволяет сокращать среднюю длину генерируемых тестов. Для определения упомянутых вероятностей решается многомерная задача поиска максимума выходной энтропии с применением генетического алгоритма. Рассмотрена задача моделирования исправного устройства и неисправных модификаций с использованием системы моделирования Active-HDL. Приведены результаты построения тестов для схем из международного каталога ISCAS'89. Выполнено их сравнение с данными, полученными другими авторами с использованием иных генетических алгоритмов.

© И.В. Уколов, 2008



### Synthesis of Pseudorandom Test Patterns for the Discrete Device

I.V. Ukolov

In article the pseudorandom method of test patterns generation for discrete devices applicable for both to combinational devices and to sequential devices is considered. The entropy approach for search of optimum distribution of probabilities of input vectors is used that allows reducing average length of generated tests. For definition of the mentioned probabilities the multivariate problem of search of a maximum of output entropy with application of genetic algorithm is solved. The problem of simulation of the correct device and faulty devices is considered based on simulation system Active-HDL. Results of tests generation for circuits from international catalogue ISCAS'89 are produced. Their comparison with the data collected by other authors with use of other genetic algorithms is done.