

- M. Dorigo, L. M. Gambardella // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1, Issue 1. – P. 53–66. doi:10.1109/4235.585892
15. Игнатъев, А. Л. Использование алгоритма муравьиных колоний для решения задачи маршрутизации транспортных средств [Электронный ресурс] : матер. IV междуна. науч.-прак. конф. / А. Л. Игнатъев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. – Режим доступа : http://2009.it-edu.ru/docs/Sekziya_8/3_Ignat%27ev_Ignatyev.doc
 16. Jun-Mam, K. Application of an Improved Ant Colony Optimization on Generalized Traveling Salesman Problem [Text] / K. Jun-Man, Z. Yi // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 17. – P. 319–325. doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.101
 17. Hlaing, Z.C. Solving Traveling Salesman Problem by Using Improved Ant Colony Optimization Algorithm / Z. C. Hlaing, M. A. Khine // International Journal of Information and Education Technology. – 2011. – Vol. 1, № 5. – P. 404-409. – doi: 10.7763/ijiet.2011.v1.67.
 18. Иванова, И. Исследование работы муравьиного алгоритма на примере задачи коммивояжера [Текст] / И. Иванова // Research and Technology: Step into the Future. – 2012. – Vol. 7, no. 3. – P. 39-46.

□ □

Пропонується новий чисельно-аналітичний метод для керування тепловими процесами. Метод базується на розв'язанні обернених задач ідентифікації функцій управління за заданими оптимальними тепловими режимами в часі. При визначенні ступеня оптимальності заданих теплових режимів враховуються всі необхідні обмеження на розподіл температури, її градієнти, швидкість нагрівання чи охолодження

Ключові слова: управління, теплові процеси, чисельно-аналітичний метод, структура рішення, S-функції, функціонал, ідентифікація, модель, розпаралелювання

□ □

Предлагается новый численно-аналитический метод для управления тепловыми процессами. Метод базируется на решении обратных задач идентификации функций управления по заданным оптимальным тепловым режимам во времени. При определении степени оптимальности заданных тепловых режимов учитываются все требуемые ограничения на распределение температуры, ее градиенты, скорость нагрева или охлаждения

Ключевые слова: управление, тепловые процессы, численно-аналитический метод, структура решения, S-функции, функционал, идентификация, модель, распараллеливание

□ □

УДК 536.24

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ ТОЧНОМ УЧЁТЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ S-ФУНКЦИЙ

А. П. Слесаренко

Доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Отдел моделирования
идентификации тепловых процессов
Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины
ул. Д. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

Ю. В. Журавлев

Кандидат технических наук, доцент, профессор
Кафедра автоматизации производственных процессов
Харьковский национальный
университет строительства и архитектуры
ул. Сумская, 40 г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

В настоящее время ежегодно производится около 160 Тб уникальных данных (согласно другим источникам это число ещё больше и составляет порядка 1 экзабайта (1000000 Тб)). Процесс конвертирования такого количества данных в структурированную форму становится невозможным. Поэтому предпочтительно организовать выходную информацию при решении задач в форме, которую не нужно дополни-

тельно обрабатывать для сжатия, анализа и поиска скрытой закономерности.

Таким образом, алгоритмы, построенные на базе регионально-структурных решений задач управления тепловыми процессами, должны быть представлены в такой форме, которая позволила бы с максимальной возможной скоростью воспроизводить их и хранить в минимальном объёме машинной памяти, что давало бы возможность оперативно их анализировать.

Для решения данной проблемы в статье поставлена и решена задача разработки численно-аналитического метода управления тепловыми процессами, позволяющего получать результаты решения для функций управления в аналитической форме. Это позволяет исследователю находить скрытые закономерности процесса при больших объёмах информации об исследуемых процессах благодаря структурно-функциональным качествам численно-аналитического метода, применяемого для решения задач управления тепловыми процессами.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследования, о которых идёт речь в статье, относятся к области управления тепловыми процессами в конструктивных элементах сложной формы при заданных ограничениях на функции управления, распределение температуры и её градиенты, а также скорость нагрева или охлаждения.

Разработка новых информационных технологий на базе численных методов, позволяющих в реальном масштабе времени проводить управление тепловыми процессами в элементах строительных конструкций, аэрокосмического, электронного, энергетического и другого оборудования с целью выбора геометрических и теплофизических параметров, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы, встречает ряд принципиальных трудностей математического характера. Так, представленные в [1] методы и средства позволяют эффективно решать поставленные задачи при небольшом количестве параметров идентификации или управления. Методы и алгоритмы решения задач теплопроводности и оптимизации тепловых режимов зданий и сооружений на основе метода конечных разностей и метода конечных элементов, рассмотренные в [2], имеют большую погрешность для параметров управления больше двух. Аналитические методы решения оптимальных по быстрдействию задач управления нагревом и охлаждением массивных элементов конструкций при ограничениях на управление, температурные напряжения, градиент температурного поля и скорость нагрева, приведенные в [3], базируются на классических аналитических решениях в виде медленно сходящихся функциональных рядов. Как показала практика применения, они эффективны только для одномерных задач с одним-двумя параметрами управления. Следует отметить, что для эффективного решения этих проблем, как указывалось в экспертных выводах крупнейших научных центров Запада, требуется разработать аналитическую поддержку принятия решений с использованием многоканальных систем согласованных дисплеев для экспресс-анализа больших объёмов информации в реальном масштабе времени.

В решении данной проблемы обычно используются численные методы, а полученные результаты в дискретном виде обрабатываются методами DATA MINING (обнаружение знаний в базах данных) для получения скрытой информации с обязательным участием эксперта-человека и интерполяционными методами для

уменьшения объёма данных (если это возможно для исследуемого процесса).

Разработанный авторами [4] региональный структурно-разностный метод основан на построении регионально-аналитических структур решения задач теплопроводности, точно удовлетворяющих нестационарным граничным условиям при любой заданной зависимости во времени коэффициентов теплоотдачи и температуры, окружающей конструктивный элемент среды. Неопределённые коэффициенты структур решения данных задач отыскиваются из решения вариационно-разностной задачи для соответствующей структурно-разностной модели тепловых процессов с использованием разностных схем высокого порядка точности и точечного метода наименьших квадратов. Это даёт возможность выполнить условия теоремы Годунова-Рябенского о том, что скорость сходимости приближенного решения к обобщённому точному решению задачи должна быть на два порядка больше, чем скорость нарастания погрешности. Поэтому применение разностных схем второго порядка точности при управлении тепловыми процессами, которые характеризуются высокими градиентами температуры как по координатам, так и по времени, приводят к неустойчивости вычислительного процесса и большим погрешностям результатов решения задач управления тепловыми процессами.

Базисные функции регионального структурно-разностного метода обладают достоинствами финитных, как функции с региональным базисом. Они бесконечно дифференцируемы, благодаря использованию S-функций, при решении вспомогательных обратных задач дифференциальной геометрии. Финитные (региональные) функции с региональным носителем позволяют получить большую точность аппроксимации решений и не распространяют региональную ошибку начальных данных на всё решение за счёт того, что базисные функции обращаются в нуль всюду, кроме заданной области. Сформированные при этом матрицы разрежены.

Такой подход используется в алгоритмах, построенных на базе регионально-структурного метода, которые обладают минимумом на два порядка большим быстрым действием и точностью, чем алгоритмы, построенные на основе вариационных и других приближённых аналитических методов.

До появления S-функций [4] не было математического инструментария, позволяющего строить непрерывно-дифференцируемые функции $\omega(x,y,z)$, для которых уравнения $\omega(x,y,z)=0$ точно бы описывали гладкие поверхности элементов строительных конструкций любой заданной сложной формы.

3. Цель работы

Разработка нового численно-аналитического метода решения задач управления тепловыми процессами. Метод базируется на решении серии обратных задач идентификации функций управления по заданным оптимальным тепловым режимом во времени. При определении степени оптимальности заданных тепловых режимов учитываются все требуемые ограниче-

ния на распределение температуры, её градиенты и скорость нагрева или охлаждения.

Граница или поверхность области описываться в аналитической форме S-функциями для любого заданного набора геометрических параметров, входящих в «опорные» функции. Данные функции точно на аналитическом уровне задают информацию о геометрии участков границы области, или частей поверхности элементов конструкции.

4. Численно-аналитический метод решения задач управления тепловыми процессами

Рассмотрим задачу управления тепловым процессом в области сложной формы Ω с границей Γ при заданных ограничениях на функцию управления и распределения температуры в области исследования, включая ограничения на температурные градиенты и скорость нагрева в следующей постановке для задачи управления:

$$\frac{\partial T(x,y,F_0)}{\partial F_0} = \Delta T(x,y,F_0), \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial T(x,y,F_0)}{\partial \nu} + Bi(F_0)T(x,y,F_0) \right]_{\Gamma} = Bi(F_0)t_c(x,y,F_0)|_{\Gamma}, \quad (2)$$

$$T(x,y,0) = \Psi(x,y), \quad (3)$$

$$T(x,y,F_0) = \eta_1(x_p, y_p), \quad (4)$$

где ν – внешняя нормаль к контуру Γ , функции $\eta_1(x, y)$ для каждого момента времени F_{0i} содержат информацию о заданных ограничениях на температуру в области Ω , её градиенты по координатам и во времени. Роль функции управления играет температура $t_c(x, y, F_0)$ греющей среды. Учитывая результаты работ [5, 6], аналитическую структуру решения задачи (1)–(4), точно удовлетворяющую нестационарному условию теплообмена (2), построим в виде:

$$\begin{aligned} T(x,y,F_0) &= \\ &= t_c(x,y,F_0) - \omega(x,y)D_1 t_c(x,y,F_0) + \phi(x,y) - \\ &- \omega(x,y)D_1 \phi(x,y) + \omega(x,y)Bi(F_0)\phi(x,y) = \\ &= \phi_0(x,y,F_0) + V(x,y,F_0), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\phi(x,y) = \sum_{k,s} C_{ks} P_k(x) P_s(y),$$

$$D_1 \phi(x,y) = \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \frac{\partial \omega(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \frac{\partial \omega(x,y)}{\partial y},$$

P_k и $P_s(y)$ – полиномы Чебышева.

Функция $\omega(x,y)$ строится с помощью S-функции и удовлетворяет условиям:

$$\omega(x,y)|_{\Gamma} = 0; \quad \omega(x,y) > 0 \quad \text{при } (x,y) \in \Omega; \quad \frac{\partial \omega(x,y)}{\partial \nu} |_{\Gamma} = 1.$$

Тогда функция $V(x,y,F_0)$ и функция управления $t_c(x,y,F_0)$ определяются из решения следующей задачи теплопроводности

$$\frac{\partial V(x,y,F_0)}{\partial F_0} = \Delta V(x,y,F_0) + \bar{F}(x,y,F_0), \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial V(x,y,F_0)}{\partial \nu} + Bi(F_0)V(x,y,F_0) \right] = 0, \quad (7)$$

$$V(x,y,0) = \bar{\Psi}(x,y), \quad (8)$$

$$V(x,y,F_0) = \bar{\eta}_1(x_p, y_p), \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{F}(x,y,F_0) = \Delta \phi_0(x,y,F_0) - \frac{\partial \phi_0(x,y,F_0)}{\partial F_0},$$

$$\bar{\Psi}(x,y) = \Psi(x,y) - \phi_0(x,y,0),$$

$$\bar{\eta}_1(x_p, y_p) = \eta_1(x_p, y_p) - \phi_0(x,y,F_0).$$

Применяя разностную схему первого порядка по времени [7, 8], решение задачи (6)–(9) сведём к последовательности соответствующих задач для каждого момента времени F_{0i} . В этих задачах для каждого момента времени функцию источника $\bar{F}(x,y,F_0)$ в уравнении (6) представим в виде:

$$\bar{F}_1(x,y,F_{0i}) = \sum_{k,s} \beta_{ks}^{(1)} P_k(x) P_s(y).$$

Соответствующие задачи для каждого момента времени F_{0i} сведём к решению m задач, в которых функция источника правой части дифференциального уравнения задачи равна $P_k(x)P_s(y)$ при соответствующих значениях k и s .

Применяя метод суперпозиции решений для каждого момента времени F_{0i} получим:

$$V_1(x,y,F_{0i}) = \sum_{k,s} \beta_{ks}^{(1)} V_{lks}(x,y,F_{0i}),$$

где $V_1(x,y,F_{0i})$ – решение задач структурно-разностным методом, в которых $\bar{F}_{ks}^{(m)}(x,y,F_{0i}) = P_k(x)P_s(y)$ при соответствующих значениях k и s .

Отыскание неопределённых коэффициентов $\beta_{ks}^{(1)}$ сводится к решению вариационной задачи для минимума функционала:

$$\begin{aligned} I_1(\beta_{ks}^{(1)}) &= \\ &= \sum_p^n \left\{ \sum_{k,s}^m \beta_{ks}^{(1)} V_{lks}(x,y,F_{0i}) - \eta_1(x_p, y_p) + \phi_0(x_p, y_p, F_{0i}) \right\}^2, \end{aligned}$$

что сводится для каждого момента времени F_{0i} к решению системы алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial I_1(\beta_{ks}^{(1)})}{\partial \beta_{ks}^{(1)}} = 0.$$

Если представить:

$$t_c(x,y,F_0) = \sum_{k,s} a_{ks}^{(1)} P_k(x) P_s(y) = \sum_{k,s} a_{ks}^{(1)} \phi_{ks}(x,y)$$

и учесть, что:

$$T_1(x, y, F_{O_1}) = t_c(x, y, F_{O_1}) - \omega(x, y)D_1 t_c(x, y, F_{O_1}) + V_1(x, y, F_{O_1}) = \sum_{k,s}^m a_{ks}^{(1)} [\varphi_{ks}(x, y) - \omega(x, y)D_1 \varphi_{ks}(x, y)] + V_1(x, y, F_{O_1}),$$

то коэффициенты $a_{ks}^{(1)}$ определяются из условия минимума функционалов:

$$I_1(a_{ks}^{(1)}) = \sum_p^n \left\{ \sum_{k,s}^m a_{ks}^{(1)} [\varphi_{ks}(x, y) - \omega(x, y)D_1 \varphi_{ks}(x, y)] + V_1(x, y, F_{O_1} 0 - \eta_1(x_p, y_p)) \right\}^2$$

путем сведения к решению системы алгебраических уравнений

$$\frac{\partial I_1(a_{ks}^{(1)})}{\partial a_{ks}^{(1)}} = 0.$$

Если в задаче (1)–(4) вместо граничного условия (2) будут граничные условия

$$\left[\frac{\partial T(x, y, F_{O_1})}{\partial v_1} + Bi_1(F_{O_1})T(x, y, F_{O_1}) \right]_{\Gamma_1} = Bi_1(F_{O_1})t_{c_1}(x, y, F_{O_1}) \Big|_{\Gamma_1};$$

$$\left[\frac{\partial T(x, y, F_{O_1})}{\partial v_2} + Bi_2(F_{O_1})T(x, y, F_{O_1}) \right]_{\Gamma_2} = Bi_2(F_{O_1})t_{c_2}(x, y, F_{O_1}) \Big|_{\Gamma_2}, \quad (10)$$

то аналитическая структура решения, точно удовлетворяющая нестационарным граничным условиям теплообмена (10) может быть построена с помощью S-функций следующим образом:

$$T(x, y, F_{O_1}) = \phi_0(x, y, F_{O_1}) + \sum_{ij} c_{ij}(F_{O_1})X_{ij}(x, y),$$

где

$$\phi_0(x, y, F_{O_1}) = [t_{c_1}(x, y, F_{O_1})\omega_2^2 + t_{c_2}(x, y, F_{O_1})\omega_1^2] [\omega_1^2 + \omega_2^2]^{-1},$$

$$X_{ij}(x, y) = \varphi_{ij}(x, y) - \omega_{12} D_1^{(12)} \varphi_{ij}(x, y) + \omega_{12} [Bi_1(F_{O_1})\omega_2 + Bi_2(F_{O_1})\omega_1] [\omega_2 + \omega_1].$$

Функции ω_1, ω_2 и ω_{12} строятся с помощью S-функции, при этом:

$$\omega_{12} = -b + \exp \omega_1 + \exp \omega_2 - \sqrt{\exp(k\omega_1) + \exp(k\omega_2)},$$

где $2 - 2\sqrt[2k]{2} \leq b \leq 1$ и удовлетворяют условиям

$$\omega_{\Gamma_1} \Big|_1 = 0; \omega_{\Gamma_2} \Big|_2 = 0; \omega_1 > 0, \omega_2 > 0 \text{ при } (x, y) \in \Omega,$$

$$\omega_{\Gamma_2} \Big|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0; \omega_{12} > 0 \text{ при } (x, y) \in \Omega,$$

$$\frac{\partial \omega_{12}}{\partial v_1} \Big|_{\Gamma_1} = 1; \frac{\partial \omega_{12}}{\partial v_2} \Big|_{\Gamma_2} = 1.$$

5. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим задачу многоступенчатого во времени управления нагревом пластины при ограничениях на функцию управления и распределения температуры в следующей постановке:

$$\frac{\partial T(x, F_{O_1})}{\partial F_{O_1}} = \frac{\partial^2 T(x, F_{O_1})}{\partial x^2}, \quad (11)$$

$$\left[\pm \frac{\partial T(x, F_{O_1})}{\partial x} + Bi(F_{O_1})T(x, F_{O_1}) \right]_{x=\pm b} = Bi(F_{O_1})t_c(F_{O_1}), \quad (12)$$

$$T(x, 0) = \Psi(x), \quad (13)$$

$$T(\pm b, F_{O_1}) = \beta t_0, \quad (14)$$

$$T(\pm b, F_{O_1}) \leq f(F_{O_1})t_0, \quad (15)$$

$$T(\pm b, F_{O_1}) - T(0, F_{O_1}) \leq \gamma t_0, \quad (16)$$

где $\Psi(x), f(F_{O_1}), Bi(F_{O_1})$ – заданные функции; β, γ – заданные коэффициенты в условиях (13)–(16); t_0 – верхний предел допустимого управления. В этом случае требуется найти такую функцию управления

$$f(F_{O_1})t_0 < t_c(F_{O_1}) \leq t_0.$$

Чтобы при ограничении на максимальную температуру пластины (14) за минимальное короткое время $F_{O_1}^*$ нагреть её, используя механизм конвективного теплообмена от начального состояния (13) в конечное $T(x, F_{O_1}^*)$ с учётом условий (14), (16). При этом на температурный режим в процессе нагрева наложено ограничение (15).

В работе [3] данная задача решена при $f(F_{O_1}) = 0.5 + 0.2 F_{O_1}$; $\Psi(x) = 0$; $Bi = 0.5$; $\beta = 0.5$; $b = 1$; $\gamma = 0.05$ с помощью традиционного в математической физике аналитического метода решения задач теплопроводности. Ввиду громоздкости полученных аналитических решений определение моментов переключения управления и времени отключения, а также построение многоступенчатого управления осуществляются с помощью ПК.

При заданных выше значениях $\Psi(x), f(F_{O_1}), Bi(F_{O_1}), \beta, \gamma$ аналитическое решение задачи (11)–(13) в первом приближении, точно удовлетворяющего условию (12) для любого момента времени при максимальном значении температуры $t_c(F_{O_1}) = 1$ построим в виде

$$T_1(x, F_{O_1}) = 1 + C_0^{(1)}(F_{O_1}) [1 + 0.75(1 - x^2)]. \quad (17)$$

Подставляя функцию (17) в уравнение (11) и применяя метод ортогональных проекций [6], получим для функции $C_0^{(1)}(F_{O_1})$ дифференциальное уравнение

$$\frac{dC_0^{(1)}(F_{O_1})}{dF_{O_1}} + C_0^{(1)}(F_{O_1}) = 0.$$

Решение данного уравнения имеет вид $C_0^{(1)}(F_{O_1}) = d_1 \exp(-F_{O_1})$.

Из условия $\int_0^1 T_1(x, 0) dx = 0$ найдём $d_1 = -2/3$.

Для определения момента времени F_{01} переключения управления используется условие

$$T_1(\pm 1, F_{01}) = 0,5 + 0,2 F_{01}.$$

Решая данное уравнение, получаем $F_{01} = 0,51$. По данным работы [3], $F_{01} = 0,466$.

Для второго региона по времени функцию $T_2(x, F_0)$, точно удовлетворяющую условию (12), при неизвестной функции $tc_2(F_0)$ построим в виде

$$T_2(x, F_0) = tc_2(F_0) + C_0^{(2)}(F_0)[1 + 0,75(1 - x^2)]. \quad (18)$$

С учетом условия $T_2(\pm 1, F_0) = 0,5 + 0,2F_0$ функцию $tc_2(F_0)$ определим в виде $tc_2(F_0) = 0,5 + 0,2F_0 - C_0^{(1)}(F_0)$, – и здесь тоже $C_0^{(2)}(F_0)$

Для функции $C_0^{(2)}(F_0)$ соответствующее дифференциальное уравнение выводится аналогично.

Подставив точное решение данного уравнения в выражение (18), получим

$$T_2(x, F_0) = 0,5 + 0,2 F_0 + 0,75(1 - x^2)[d_2 \exp(-3 F_0) - 0,133]. \quad (19)$$

Коэффициент d_2 определяется из условия:

$$\int_0^1 [T_{k+1}(x, F_{0k}) - T_k(x, F_{0k})] dx = 0, \quad (20)$$

при $k = 1$, при этом получим $d_2 = -1,2497$. Тогда функция $tc_2(F_0)$ преобразуется к виду

$$tc_2(F_0) = 0,633 + 0,2 F_0 + 1,2497 \exp(-3 F_0). \quad (21)$$

Момент времени F_{02} , переключения управления определяется из условия

$$T_2(1, F_{02}) = 0,8 = 0,5 + 0,2 F_{02}.$$

В этом случае, как и в работе [3], $F_{02} = 1,5$.

Для третьего региона во времени функцию $T_3(x, F_0)$ построим в виде (18)

$$T_3(x, F_0) = tc_3(F_0) + C_0^{(3)}(F_0)[1 + 0,75(1 - x^2)]. \quad (22)$$

Ограничение (14) для функции $tc_3(F_0)$ дает

$$tc_3(F_0) = 0,8 - C_0^{(3)}(F_0). \quad (23)$$

Применяя метод ортогональных проекций к уравнению (11) для функции (22), решая точно соответствующее дифференциальное уравнение для функции $C_0^{(3)}(F_0)$ и подставляя результат в выражение (22) получаем:

$$T_3(x, F_0) = 0,8 + 0,75d_3 \exp(-3 F_0)(1 - x^2). \quad (24)$$

Неопределенный коэффициент d_3 находим из условия (20) при $k=2$. Подставляя результат в формулы (23), (24), получаем

$$tc_3(F_0) = 0,8 + 13,2489 \exp(-3 F_0), \quad (25)$$

$$T_3(x, F_0) = 0,8 - 9,9367 \exp(-3 F_0)(1 - x^2). \quad (26)$$

С учетом условия (16) приходим к уравнению

$$-3F_0 = \ln\left(\frac{5}{993,67}\right), \quad (27)$$

для определения времени отключения управления. Из решения уравнения (27) $F_{0*} = 1,764$, по данным работы [3], $F_{0*} = 1,794$.

На рис. 1 кривая 1 характеризует трёхступенчатое управление нагревом пластины. Температура пластины $T(1, F_0)t_0^{-1}$ и $T(0, F_0)t_0^{-1}$ изображена кривыми 2 и 3. Точками на рис. 1 представлены результаты, полученные по формулам (17), (19), (21), (25), (26).

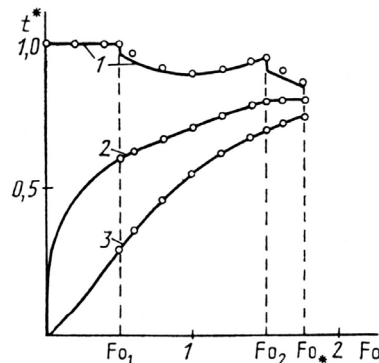


Рис. 1. Трёхступенчатое управление $t^* = t_{cp}(F_0)t_0^{-1}$ (кривая 1 нагревом пластины; температура пластины $T(1; F_0)t_0^{-1}$, $T(0; F_0)t_0^{-1}$ (кривые 2 и 3)

Данный подход позволяет впервые эффективно построить оптимальное по быстродействию многоступенчатое управление нестационарными температурными режимами тел простой формы, включая сплошные полые цилиндры и шары, даже при использовании не более одной-двух базисных функций.

6. Выводы

Двухмерные и трёхмерные задачи управления тепловыми процессами с заданными ограничениями на функции управления, распределение температуры и её градиенты, а также скорость нагрева относятся к числу задач, для которых всё ещё остается много нерешённых проблемных вопросов.

Точное решение двухмерных и трёхмерных обратных задач аналитической и дифференциальной геометрии в плане получения гладких решений встречала принципиальные трудности математического характера.

R – функции не позволяли решать обратные задачи дифференциальной геометрии. Полученные ими точные решения обратных задач аналитической геометрии имели разрывные производные в угловых точках границы области и разрывные производные на рёбрах кусочно-гладкой поверхности [9, 10].

Использование данных результатов в алгоритмах решения задач управления тепловыми процессами не представляется возможным, так как, разрывные производные в угловых точках границы и на рёбрах поверхности области приводят к развалу вычислительного процесса при использовании итерационных методов. Как

показали результати рішення нестационарних задач теплопроводності [4], S-функції повністю устранили ці серйозні недоліки, так як вперше дозволили отримувати гладкі рішення обернених задач аналітиче-

скої і диференціальної геометрії. Максимальні похибки при рішенні нестационарних задач теплопроводності з використанням S-функцій не перевищили 0.16 % для відносної похибки.

Література

1. Мацевитий, Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т. Т.2. приложения [Текст] / Ю. М. Мацевитий. – Киев: Наук думка, 2002. – 391 с.
2. Маляренко, В. А. Техническая теплофизика ограждающих конструкций, зданий и сооружений [Текст] / В. А. Маляренко, А. Ф. Редько, Ю. И. Чайка, В. Б. Поволочко. – Харьков: Рубикон, 2001. – 279 с.
3. Вигак, В. М. Оптимальное управление нестационарными температурными режимами [Текст] / В. М. Вигак. – Киев: Наук думка, 1979. – 359 с.
4. Слесаренко, А. П. Структурно-разностный подход математическому моделированию высокоскоростных тепловых процессов с нестационарным теплообменом на поверхности конструктивных элементов [Текст] / А. П. Слесаренко, Ю. О. Кобринович // Проблемы машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 66–75.
5. Слесаренко, А. П. S-функції в обернених задачах аналітичної геометрії і моделювання теплових процесів [Текст] / А. П. Слесаренко // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2011. – Т. 3, 4 (51). – С. 41–46.
6. Слесаренко, А. П. S-функції в обернених задачах диференціальної геометрії і управлінні формування форм [Текст] / А. П. Слесаренко // Восточно-Европейський Журнал передових технологій. – 2012. – Т. 1, № 4 (55). – С. 4–10.
7. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
8. Болтянский, В. Г. Оптимальное управление дискретными параметрами [Текст] / В. Г. Болтянский. – М.: Наука, 1973. – 446 с.
9. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика [Текст] / В. Н. Богословский. – М.: Высш. школа, 1985. – 367 с.
10. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределёнными параметрами [Текст] / А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.

Запропоновано семи-параметричний підхід до вирішення задач ймовірнісної діагностики, заснований на апараті розкладу у просторі з порідним елементом. Синтезовано адаптивні процедури поліноміальної узгодженої фільтрації, призначені на виявлення та ідентифікації типів розладки негаусових випадкових процесів при їх моментно-кумулянтному описі. Проведено статистичне моделювання на прикладі послідовного виявлення розладки по середньому та дисперсії

Ключові слова: розладка, узгодженість, стохастичний поліном, негаусові процеси, статистики вищих порядків

Предложен семи-параметрический подход к решению задач вероятностной диагностики, основанный на аппарате разложения в пространстве с порождающим элементом. Синтезированы адаптивные процедуры полиномиальной согласованной фильтрации, предназначенные для обнаружения и идентификации типов разладки случайных негауссовских процессов при их моментно-кумулянтном описании. Проведено статистическое моделирование на примере последовательного обнаружения разладки по среднему и дисперсии

Ключевые слова: разладка, согласование, стохастический полином, негауссовские процессы, статистики высших порядков

УДК 519.218

ЗАСТОСУВАННЯ РОЗКЛАДУ В ПРОСТОРІ З ПОРІДНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ЙМОВІРНІСНОЇ ДІАГНОСТИКИ

С. В. Заболотній

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра радіотехніки
Черкаський державний
технологічний університет
бул. Шевченка, 460,
м. Черкаси, Україна, 18000
E-mail: zabolotni@ukr.net

1. Вступ

Виявлення та ідентифікація несправностей (FDI – Fault Detection & Identification) технічних систем є

однією із найважливіших проблем сучасної інженерії. Оскільки значна частина інформаційних процесів за своєю природою має стохастичний характер, а на детерміновані сигнали зазвичай діють зовнішні випад-