

Киевский политехнический институт

На правах рукописи

ВАН ХУА
(Китайская народная республика)

УДК 681.621

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Специальность: 05.13.01-Управление в технических системах

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

КИЕВ - 1993

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики Киевского политехнического института.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
профессор Киричков В.Н.

Официальные опоненты: доктор технических наук,
профессор Сильвестров А.Н.

кандидат технических наук,
старший преподаватель Синицин И.В.

Ведущая организация : Институт проблем регистрации информации
АН Украины.

Защита состоится "17" мая 1993 г. в 15⁰⁰ часов на
заседании Специализированного совета по присуждению ученой степени
кандидата технических наук (шифр К 068.14.01) в Киевском
политехническом институте по адресу: 252056, г. Киев, проспект
Победы, 37. корп 22 комн. 503

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского
политехнического института.

Автореферат разослан "25" марта 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук



Ю.И.Шульга

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00814613 (N)

А Н Н О Т А Ц И Я

Целью настоящей работы является разработка и исследование эффективных (в вычислительном плане) последовательных процедур идентификации процессов теплообмена, опирающихся на решение ОЗТ по результатам измерений температурных полей в условиях помех.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Проведен анализ методов решения ОЗТ в условиях помех.
2. Разработан подход к синтезу алгоритмов решения ОЗТ на основе теории цифровой фильтрации.
3. Разработан и исследован ЦФ для оценивания характеристик теплообмена на границе твердого тела по результатам температурных измерений внутри тела.
4. Разработаны и исследованы адаптивные ЦФ для определения параметров теплообмена в условиях неопределенности и зависимости теплофизических характеристик тела от температуры.

Автор защищает

1. Выбор структур фильтров для восстановления параметров теплообмена на границе твердого тела по температурному полю внутри тела.
2. Алгоритмы определения параметров фильтров в условиях неопределенности.
3. Адаптивный алгоритм оценивания параметров теплообмена на базе ЦФ при зависимости теплофизических характеристик тела от температуры.
4. Методику применения разработанных синтезированных фильтров для решения задач расчета тепловых потоков при горячей штамповке.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для решения задач в условиях агрессивной среды, а также при исследовании теплообменных процессов, в тепловом проектировании и моделировании тепловых режимов, технических систем в последнее время интенсивно развиваются методы идентификации характеристик тепловых процессов, опирающиеся на решение обратной задачи теплопроводности. Особое распространение эти методы получили при экспериментальном изучении нестационарных тепловых процессов, сопровождающих работу теплонагруженных

агрегатов, систем двигателей внутреннего сгорания, ядерных реакторов, космических спускаемых аппаратов и в ряде других научно-исследовательских и технических областей, в частности, в энергетике, металлургии, химической технологии, то есть там, где невозможны прямые методы из-за недоступности или агрессивности среды. При решении этих задач существует ряд трудностей. 1. Некорректность задачи оценивания. 2. Сложность и уникальность тепловых экспериментов связана с плохой воспроизводимостью тепловых экспериментов. 3. Ограниченная точность измерения и регистрации данных тепловых процессов. 4. Малый объем априорной информации об искомом сигнале и помехах. 5. Большие затраты ресурсов ЭВМ при расчете характеристик тепловых процессов, связанные с размерностью. Вследствие важности для решения многих технических проблем разработка быстродействующих эффективно реализуемых на ЭВМ методов решения ОЗТ является актуальной задачей.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались: методы функционального анализа, теория вероятностей и статистики, методы моделирования и идентификации, оптимального управления и оценивания.

Научная новизна. Выбор структур фильтров для восстановления параметров теплообмена на границе твердого тела по температурному полю внутри тела.

Алгоритмы определения параметров фильтров в условиях неопределенности.

Адаптивный алгоритм оценивания параметров теплообмена на базе ЦФ при зависимости теплофизических характеристик тела от температуры.

Методика применения разработанных синтезированных фильтров для решения задач расчета тепловых потоков при горячей штамповке.

Практическая ценность. Проведенные в работе исследования позволили значительно сократить временные затраты на решение обратных задач теплопроводности. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для идентификации тепловых процессов.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе, результаты использованы в учебном процессе в курсах идентификации и моделирования технологических процессов.

Апробация работы. Исследования, выполненные в диссертационной

работе являюсь составной частью научно-исследовательских работ, проведенных на кафедре технической кибернетики Киевского политехнического института. Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях профессорско-преподавательского состава Киевского политехнического института 1990, 1991, 1992, 1993 гг. На научных семинарах кафедры технической кибернетики.

Публикации. По результатам выполненных в диссертационной работе исследований опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 113 страницах основного текста, иллюстрированного 20 рисунками, списка использованной литературы, включающего 148 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Из проведенного в первой главе обзора методов решения обратных задач теплопроводности для достижения цели работы может быть выбран подход, использующий описание модели процесса нестационарной теплопроводности в твердых телах на базе теоремы Дюамеля, в основе которой лежит интегральная модель, описываемая интегральным уравнением. И хотя данный подход предлагает линейность задачи, т. е. независимость теплофизических характеристик тела от температуры, но он обладает рядом других очень важных свойств, необходимых для построения достаточно общего и эффективного в вычислительном плане метода решения ОЗТ. Из множества обратных задач в работе рассмотрены граничные ОЗТ, как наиболее распространенные и информативные для идентификации тепловых процессов. Из граничных задач выбрана вторая граничная задача, наиболее сложная и универсальная. Решив ее, можно рассчитать граничные условия I и III рода. Один из возможных подходов к построению последовательной процедуры оценивания теплового потока состоит в использовании теории цифровой фильтрации, накопившей большой опыт в разработке последовательных процедур оценивания сигналов. Такую процедуру можно назвать цифровым фильтром. Для построения цифрового фильтра (ЦФ) необходимо найти его структуру, которую можно задать уравнением связи вход-выход, затем определить его параметры и найти физически реализуемый на ЦВМ фильтр. На всех трех этапах используется

априорная информация (АИ) о сигналах и помехах, модели измерения, о подходящих критериях оценки результата фильтрации и многих других особенностях, позволяющих выбрать наилучшую оценку полезного сигнала. Формализация этой информации помогает построить модели процессов фильтрации. Можно выделить два класса таких моделей, опирающихся соответственно на использование интегрального и дифференциального операторов оценивания. Преимущества интегральной модели в том, что твердое тело может иметь произвольную форму и теплофизические свойства могут зависеть от координаты; распределение температуры может быть 1-о, 2-х, 3-х мерным; описание годится для тел различной геометрической формы; можно решать 1-о, 2-х, 3-х мерные ОЗТ; на основе этого подхода можно построить общую процедуру решения ОЗТ независимо от того каким уравнением в частных производных описывалась исходная задача (эллиптического, параболического или гиперболического типа); могут быть рассмотрены задачи с разнородными материалами с идеальным и неидеальным контактом. Для построения фильтра используется следующая АИ: модель процесса распространения тепла описывается линейными интегральными уравнениями, модель измерения — линейна, интервалы наблюдений могут быть ограниченными, характеристики сигналов и помех на отдельных интервалах могут быть разнообразными, сигнал представляет собой процесс, хорошо аппроксимируемый на отдельных интервалах наблюдения функциями из $W(a, b)$, а помеха — аддитивный некоррелированный с сигналом процесс из $L(a, b)$ с симметричной относительно нулевого матожидания и нормальной плотностью распределения. Критерии оценивания: точность (величина байесовского риска) и быстродействие (количество операций умножения и сложения). Допустима задержка для оценки $\hat{q}(t + \tau)$ по отношению к наблюдаемому сигналу $r(t)$. Может быть задана еще информация о статистических характеристиках оцениваемого вектора $q(t)$ или о связях неизмеряемых его компонент с измеряемыми параметрами или между собой. Требуется построить фильтр для оценивания вектора $q(t)$ по имеющейся АИ и результатам измерений $r(t)$. Для применения такого фильтра в автоматизированных системах оценивания необходимо автоматизировать процесс синтеза фильтра и его реализации. Определяющей при этом является АИ о характеристиках процессов распространения тепла в твердом теле, искомым сигналам и помех. Во второй главе рассматривается подход к

построению последовательной процедуры решения линейной обратной задачи теплопроводности. Она используется для оценивания плотности теплового потока $q(t)$, характеризующего процессы теплообмена в твердом теле, по результатам измерений температурного поля внутри тела в присутствии помех. Анализ и синтез процедуры опираются на теорию цифровой фильтрации. Процедура реализуется в виде цифрового фильтра.

Структура фильтра определяется при решении задачи оптимизации критерия точности оценивания с учетом быстродействия. По критерию быстродействия оптимальными являются линейные алгоритмы, получаемые при гауссовских распределениях. При решении реальных задач, если допустить снижение точности оценивания, за счет использования гауссовских аппроксимаций распределений сигналов и помех, а также учитывая линейность модели измерения, то лучшими будут линейные алгоритмы оценивания. Ввиду широкого распространения в практических задачах распределений, близких к гауссовским, выбирается структура фильтра, описываемая линейным оператором. Передаточная функция этого фильтра определяется при решении задачи минимизации среднеквадратической ошибки (СКО) оценивания при ограничениях, задаваемых интегральным уравнением процесса распространения тепла.

$$T(x, y, t) = \int_a^b d\tau \int_0^x {}^2b(x, y, t - \tau) Z(x, y, \tau) dx + V(t) \quad (1)$$

Таким образом, описывается задача теплопроводности в интегральной форме при измерении $T(x, t)$ в одной точке. Рассмотрим возможность использования этой простой формы для решения многомерных задач. Пусть места установки датчиков определяются координатами (dx, dy) . При описании такой задачи можно использовать двумерный подход, но при этом анализ и количество вычислений резко возрастает. Рассмотрим более простой подход, сводящий задачу к одномерному варианту. Подход заключается в сведении многомерной задачи к векторной. В этом варианте считаем, что распространение тепла в теле происходит строго по нормали от поверхности к месту установки датчика согласно одномерной модели распространения тепла. Таким образом, если температурное поле измеряется n датчиками, то информация об этом поле хранится в n -мерном векторе. Многомерность в таком представлении, т. е. когда необходимо учесть

распространение тепла внутри тела вдоль поверхности, может быть получена при введении матрицы влияний C . Тогда полный тепловой поток, действующий на поверхности с учетом многомерности $z(t)$, выражается через одномерные нормальные составляющие теплового потока, действующего на поверхности тела $q(t)$.

$$Z(t) = C q(t), \quad (2)$$

где C - матрица размерности $n \times n$.

В работе принято, что АИ о частотных характеристиках задается для $z(t)$, $v(t)$, $b(t)$. Найденная передаточная функция фильтра $w(\omega)$ описывается выражением

$$\hat{w}(\omega) = C^{-1} W(\omega) = C^{-1} S(\omega) V^T(\omega) [V(\omega) S(\omega) V^T(-\omega) + S_v(\omega)]^{-1} \quad (3)$$

где $S(\omega)$ - оценка спектральной плотности сигнала $z(t)$, $t \in [0, T]$, определяемая выражением $S_z(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T |z(\omega)|^2 dt$, где \int - оператор усреднения по множеству реализаций $z(\omega)$ и $V(\omega)$ - преобразования Фурье функций $z(t)$ и $b(t)$, продолженных с периодом T на всю вещественную ось. Аналогично определяется $S_v(\omega)$. Чтобы обобщить решение (3) на случай задания другой АИ о сигналах и помехах, вводятся аппроксимации компонент матриц $S_z(\omega)$ и $S_v(\omega)$ следующего вида:

$$\hat{S}_{ij}(\omega) = \alpha_{ij} M_{ij}(\omega) \alpha_j, \quad M_{ij}(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega - \omega_{0ij})^2 = b_{ij}^2}, \quad i, j = 1, n, \quad (4)$$

где параметры α_i , ω_{0ij} , b_{ij} - определяются по АИ. Согласно выражению (3) в структуре многомерного фильтра можно выделить два элемента: линейный преобразователь (ЛП), описываемый матрицей C^{-1} и фильтр $w(\omega)$, который в свою очередь состоит из одномерных фильтров с передаточными функциями $w_{ij}(\omega)$. Для реализации такого фильтра во временной области необходимо рассчитать n импульсных характеристик (ИХ) этих одномерных фильтров.

Следующим после нахождения структуры является этап расчета параметров фильтров по АИ о частотных характеристиках датчиков, сигналов и помех. Элементы $w_{ij}(\omega)$ можно представить в виде $w_{ij}(\omega) = K_{ij}(\omega) / V_{ij}(\omega)$, где $K_{ij}(\omega)$, так называемый, сглаживающий множитель, для диагонального приближения $\hat{w}(\omega)$ имеет вид

$$K_i(\omega) = \frac{|V_i(\omega)|^2}{|V_i(\omega)|^2 + S_{v_i}(\omega) / S_{z_i}(\omega)} \quad (5)$$

В котором вместо $s_{\pm l}(\omega)$ и $s_{\pm l}(\omega)$ могут быть использованы аппроксимации (4). В случае, когда $s_{\pm l}(\omega)$ и $s_{\pm l}(\omega)$ непересекаются или заданы

$$K_l(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 < \omega < \omega_{cp} \\ 0, & \omega \geq \omega_{cp} \end{cases} \quad (6)$$

Параметры выражений (4-6) рассчитываются для различных подуровней АИ с использованием разработанных в диссертации, а также известных методов, таких, как метод невязки.

После определения структуры и параметров становится известной форма желаемых частотных характеристик (ЧХ) фильтров, и дальнейшим этапом является построение физически реализуемых фильтров с заданными ЧХ. Для решения этой задачи предлагается использовать универсальный метод аппроксимации желаемой частотной характеристики фильтра частотной характеристикой физического реализуемого. Наиболее известными методами их синтеза являются метод "окна", метод частотной выборки.

На этом завершается описание методов проектирования линейных ЦФ. В третьей главе рассмотрены методы адаптации разработанных линейных последовательных алгоритмов оценивания нестационарных граничных условий к априорной неопределенности оцениваемых характеристик и помех, а также к изменению теплофизических характеристик материала в процессе оценивания.

В линейном фильтре применяется сглаживающий множитель вида (5) или (6) с параметром регуляризации α или ω . Обозначим обобщенный параметр регуляризации p . В работе разработаны алгоритмы, построенные на основе критериев, использующих понятие остаточной суммы квадратов $RSS(p)$. $RSS(p) = \|T - \hat{Z}(p)\|_{L_2}^2$. Например, для критерия, основанного на вычислении F-статистически по формуле

$$F(p) = \frac{[RSS(p-1) - RSS(p)](n-p)}{RSS(p)} \quad (7)$$

где n - число отсчетов наблюдаемого сигнала, а p - варьируемый искомый параметр. Эта статистика имеет распределение Фишера со степенями свободы 1 и $n - p$. В качестве оценки для $p_{опт}$ принимается наименьшее p , удовлетворяющее условиям

$$F(p) > F_{\beta}(1, n-p), \quad F(p+1) \leq F_{\beta}(1, n-p-1) \quad (8)$$

где $F_{\beta(1, n-p)}$ - квантиль уровня β распределения Фишера, обычно $\beta=0,9 - 0,95$. Как показали эксперименты, этот критерий не всегда дает удовлетворительные результаты из-за субъективности выбора β .

Другой критерий построен на основе метода перекрестного обоснования. Обозначим через $(\hat{v}_p^k)^{ckz}$ приближение, построенное по исходным данным с удаленным значением T_k . Введем функционал

$$u(p) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [T_k - (\hat{v}_p^k)^{ckz}]^2, \quad (9)$$

определяющий среднеквадратичную ошибку предсказания значений T_k . Оптимальное значение p соответствует минимуму функционала $u(p)$.

Наряду с рассмотренными методами регуляризации в условиях неопределенности может быть предложен еще один подход. Сущность его заключается в повороте вектора погрешности, не обязательно уменьшая его амплитуду. В результате можно получить хорошие результаты оценивания параметров при "плохой" фильтрации. Этот подход учитывает комплексность задачи оценивания параметров и фильтрации исходных данных и является одним из видов рандомизации задачи. Если обозначить p и d соответственно классический параметр регуляризации и используемый в этом подходе, то для определения наилучших их значений, которые в конечном счете приведут к наилучшим значениям оценок искомым параметров модели, можем использовать следующий алгоритм.

Вначале определяются начальные и конечные d_H и d_K , затем последовательно перебирая $d_i \in [d_H, d_K]$, вычисляем $z(d_i)$, и выбираем такое d_i , при котором оценки T_i найденные по (I) будут удовлетворять критерию

$$\epsilon^*(p^*, d^*) = \min_{\substack{d \in D \\ p \in P}} [T_i(p_i, t) - T_i(d_i, t)] \quad (10)$$

где $T_i(p_i, t)$ - оценка исходных данных, полученная при их сглаживании с параметром фильтра p_i .

В работе [2] также анализируется эффективность использования для этого среднеквадратического критерия $\epsilon^*|\Delta|$, а также в [1] проведен сравнительный анализ критериев вида $\epsilon^*|\Delta|$ и $\epsilon|\Delta|$, и показано, что при наличии выбросов в исходных данных критерий $\epsilon|\Delta|$

является более эффективным.

Дальше рассмотрена разработка последовательных алгоритмов решения ОЗТ при зависимости теплофизических характеристик от времени. Пусть зависимости изменения ТФХ от времени заданы в виде функции $\epsilon = \rho = \epsilon(\rho(t))$, $\lambda = \lambda(t)$. Для расчетов часто используют коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{\epsilon \rho} = a(t)$, который входит непосредственно в коэффициент Фурье F_0 . При переменных во времени ТФХ решение ОЗТ несколько усложняется и замедляется. Это связано с проблемами расчета функции влияния. Дело в том, что при переменных λ и a , нет аналитических и табулированных решений прямой задачи и возникает необходимость в численном расчете, что и замедляет весь процесс решения ОЗТ. Существует 2 пути преодоления этой проблемы.

Рассмотрим первый из них. В этом случае задача может быть сведена к решениям при постоянных ТФХ. Для решения ОЗТ необходимы знания значений функции влияния $\frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$. Они могут быть определены из решения прямой задачи. Так как в решение входят величины a и t , то учет изменения коэффициента температуропроводности производится

путем введения в расчет его среднего значения. $a_{cp} = \frac{1}{t} \int_0^t a(t) dt$. Далее все расчеты ведут, принимая коэффициент температуропроводности постоянным и равным a_{cp} . А значение критерия Фурье F_0 , используемое при расчете температуры, оказывается равным

$$F_0 = \frac{1}{l^2} \int_0^t a dt = \frac{a_{cp} t}{l^2}, \text{ где } l \text{ толщина пластины.}$$

В решение входит также коэффициент теплопроводности λ . Его осреднить нельзя. Дело в том, что λ непосредственно входит в расчеты температурного поля для каждого момента времени. Поэтому даже при одинаковых значениях F_0 , при различных λ будет иметь место не равенство, а лишь подобие температурных полей, что уже не дает права решать задачу осреднением λ . В этом случае задачу можно решить следующим способом.

Пусть некоторое время на тело воздействует постоянный тепловой поток. В этом периоде $a = a_1$, $\lambda = \lambda_1$. А затем тепловой поток обнуляется и одновременно изменяются теплофизические характеристики a и λ . Определим тепловое состояние во втором периоде при $q=0$. В этом периоде, когда происходит выравнивание температуры при нулевом граничном условии, решение не зависит от λ , поэтому процесс выравнивания температуры при одинаковых начальных

условиях идет одинаково в телах при различных λ , определяющим является только критерий F_0 , следовательно лишь $a(t)$ влияет на температуру, а значение λ может приниматься любым, например λ_0 . Таким образом, задача свелась к задаче с переменными граничными условиями и переменным a . При этом полученное граничное условие можно представить в виде суммы более простых граничных условий, при постоянных λ , а решение такой задачи может быть представлено суммой решений при этих простых граничных условиях. Нужно знать только моменты изменения λ , при известной $\lambda(t)$. Это задача аппроксимации $\lambda(t)$ — кусочно постоянной функцией при ограничении ошибки аппроксимации некоторой заданной величиной. Чем меньше требуется эта ошибка, тем больше переключений.

Второй способ решения ОЗТ при переменных λ и a состоит в том, чтобы аппроксимировать $\lambda(t)$ и $a(t)$ кусочно постоянной функцией и на интервалах постоянства решать ОЗТ. Этот способ является более общим. Его можно использовать также и для решения более сложных задач при существенной зависимости теплофизических характеристик от температуры. В этом случае ОЗТ становится нелинейной. Рассмотрим два случая: первый — когда температурное поле, измеренное внутри тела, известно на наблюдаемом интервале времени (режим *offline*), второй — когда обработка идет в течение реального времени и пришедшие от датчиков отчеты температуры сразу же поступают на обработку (режим *online*).

И в первом и втором случае подход к решению задачи одинаков: весь расчетный период разбивается на интервалы, внутри которых значение a и λ принимаются постоянными и одинаковыми во всем теле. Температура в конце каждого расчетного интервала служит основанием для задания новых значений a и λ для следующего промежутка времени. Однако в первом случае этот расчетный период и температуры на нем уже известны, а во втором — нет. Поэтому первый случай более простой, с него и начнем.

Пусть известны значения температурного поля $T(x, t)$ и кривые зависимости ТФХ от температуры $a(t)$ и $\lambda(t)$ и рассчитать на интервалах постоянства a и λ функции влияния $\frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$, после чего для каждого расчетного интервала можно решить ОЗТ. Для определения расчетных интервалов или моментов переключения поступим следующим образом. Так как известна $T(x, t)$ на интервале наблюдения $[t_0, t_1]$, то задан диапазон изменения температур $\Delta T = \max_T T(x, t) - \min_T T(x, t)$.

Аппроксимируем кривую $\lambda(\tau)$ на диапазоне $\Delta\tau$ кусочно постоянной функцией $\hat{\lambda}$ таким образом, чтобы ошибка аппроксимации не превышала наперед заданного значения. Скачки функции $\hat{\lambda}$ укажут нам поддиагоны температур $\Delta\tau_i$, в которых изменение теплофизических характеристик тела можно считать несущественно отличающимися от постоянных значений $\hat{\lambda}_i$. В задаче $\hat{\lambda}(\tau)$ получается после согласования кусочно-постоянных аппроксимаций $\hat{\lambda}(\tau)$ и $\hat{a}(\tau)$. После разбиения на интервалы рассчитываются функции влияния для постоянных значений a и λ . При расчете существуют следующие особенности: конечно, учитываются изменяющиеся начальные условия в соответствии с графиком переключения, но кроме того температуры необходимые для расчета $\frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$ определяются в 2-м этапе. На первом этапе рассчитываются профили температур $T = T(x)$, затем производится осреднение теплофизических характеристик по времени и по толщине тела в соответствии с полученной кривой $T(x)$ и эти осредненные характеристики уже принимаются за расчетные. Определив функции влияния для заданных диапазонов температур $\Delta\tau_i$, мы с их помощью обрабатываем кривые $T(x, t)$ на соответствующих отрезках времени и получаем на них оценки $\hat{q}(t)$.

Сложнее дело обстоит при неизвестной зависимости $T(x, t)$ от времени. В этом случае весь диапазон изменения температуры T , который может быть известен из технических условий эксплуатации, разбивается на интервалы, так же, как и в первой задаче и рассчитываются для них функции влияния. Решение о переключении с одной функции влияния на другую будем принимать на основании прогноза изменения $T(x, t)$ во времени, который можно построить. Можно прогнозировать и по $\hat{q}(t)$, но прогноз по T выбран потому, что это более инерционная и потому более предсказуемая характеристика особенно внутри тела.

Для решения задачи прогнозирования температуры строится векторный прогнозирующий фильтр. Прогноз делается на основании значений температурного поля, полученных в результате измерений датчиками. Для построения прогнозирующего фильтра необходима априорная информация, чем ее больше, тем точнее можно осуществить прогноз, если ее нет, то рассчитываем параметры прогнозирующего фильтра на основе метода наименьших квадратов.

В четвертой главе разработан и проанализирован случай практического применения предложенных в работе методов

идентификации характеристик тепловых процессов, протекающих при горячей штамповке. Полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость оценок, полученных разными методами, и подтверждают работоспособность разработанных алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Основным результатом диссертационной работы является разработка и исследование универсального ЦФ решения обратных задач теплопроводности при различных граничных условиях по результатам измерений температурного поля, выполненных датчиками во внутренних точках тела в присутствии помех. Построен векторный последовательный алгоритм оценивания характеристик теплообмена на основе теории цифровой фильтрации. Качественными отличиями разработанного алгоритма являются: универсальность по отношению к используемой для настройки его параметров АИ о сигналах и помехах, устойчивость фильтра к ошибкам вычислений; использование малого объема АИ для настройки фильтра. Указанные свойства получены за счет применения подхода с использованием алгоритмов регуляризации. Применение этого подхода позволило при сохранении точности повысить быстродействие процедуры оценивания.

2. Рассмотрен общий метод синтеза одномерных и двумерных фильтров. В нем используется итерационная процедура оптимизации, достаточно сложная, сходимость которой зависит от выбора удачного начального приближения. Рассмотрен один из возможных методов выбора начального приближения. Этот метод сам по себе дает неплохие результаты синтеза фильтра, является быстрым и можно с успехом использоваться самостоятельно.

3. Для решения обратных задач теплопроводности при изменяющихся во времени теплофизических характеристик тела предложены методы адаптации разработанных во второй главе фильтров, что значительно расширяет диапазон использования построенных фильтров для решения реальных задач. Для режимов оценивания *offline* и *online* разработана процедура решения нелинейных обратных задач теплопроводности при зависимости теплофизических характеристик тела от температуры с помощью построенных во второй главе фильтров. Этот подход позволяет значительно ускорить процесс решения нелинейных обратных задач теплопроводности, что достигается за счет преимуществ

использования быстрых алгоритмов оценивания, разработанных во второй главе.

4. Выбрана структура фильтра и разработаны алгоритмы адаптации построенных фильтров для решения обратных задач теплопроводности в условиях отсутствия априорной информации об искомым сигналах и помехах. За счет выбора структуры с минимальным количеством оцениваемых параметров фильтра достигается высокая скорость адаптации и робастность фильтра к априорной неопределенности.

5. Разработан и проанализирован случай практического применения предложенных в работе методов идентификации характеристик тепловых процессов, протекающих при горячей штамповке. Полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость оценок, полученных разными методами, и подтверждают работоспособность разработанных алгоритмов.

Автор выражает свою искреннюю благодарность своему научному руководителю-кандидату технических наук профессору Киричкову В. Н. и кандидату технических наук старшему научному сотруднику Сафронову В. А. за научное руководство и ценные замечания, высказанные в ходе подготовки работы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Киричков В.Н. Ван Хуа, Асимптотическая эффективная оценка регуляризованных критериев $|\bar{\epsilon}^2|$ и $|\bar{\epsilon}|$ //Адаптивные САУ. -1992. -№ 20. -с. 8-13.

2. Киричков В.Н. Ван Хуа, Анализ эффективности среднеквадратичного критерия при переменных измеренных помехах. //Адаптивные САУ. -1993. -№ 21.

3. Ван Хуа, Сафронов В. А. Адаптация последовательных процедур решения ОЗТ построенных на основе теории цифровых фильтров. Киев. политехн. ин-т. -Киев, 1992. -7 с. -Библиогр: 5 назв. -Рус. -Деп. в УкрИНТЭИ I4. IO. 92, № I579 - Ук 92.

4. Ван Хуа, Киричков В. Н. Сафронов В. А. Применение теории цифровой фильтрации для решения обратных задач теплопроводности. Киев. политехн. ин-т. -Киев, 1992. -13 с - Библиогр.: 4 назв - Рус.- Деп. в УкрИНТЭИ I4.IO.92, № I580 - Ук 92.

АВ 26.947

Подп. к печ. 17.3.93. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$ Бумага Тм 1/2.
Печ. офс. Усл. печ. л. 0,69 Уч.-изд. л. 0,54 Тираж 100.
Зак. Э-3369

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Репина, 4.