

05.13.14

Р939

Контрольный  
экземпляр

На правах рукописи

**РЫЖКОВА Ирина Анатольевна**

**АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ОЦЕНКИ УСКОРЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЯ ИНДЕНТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ  
ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.13.14 — “Системы обработки  
информации и управления”

Автореферат  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 1998

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор Жабреев В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Шестаков А.Л.;

кандидат технических наук, доцент Кощеев А.А.

Ведущая организация — СКБ «Ротор», г. Челябинск.

Защита диссертации состоится 29 апреля 1998 г., в 15 ч, на заседании диссертационного совета Д 053.13.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" марта 1998 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

М.Н. Устюгов



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

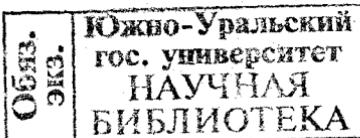
**Актуальность темы.** При создании и эксплуатации современной техники предъявляют высокие требования к надежности изделий, а следовательно, и к качеству материала (металла), в частности к таким его свойствам, как вязкость, твердость, упругость, выносливость, прочность, пластичность.

Отечественные экспериментальные направления по исследованию механических характеристик материалов были созданы Н.Н. Давиденковым (удар, деформации), Р.Г. Губайдулиным (проблемы прочности), Б.С. Иоффе (физика прочности), В.Д. Кузнецовым (механические свойства монокристаллов), Н.А. Одигром (ползучесть), С.В. Серенсеном (усталость), Я.Б. Фридманом (механическая прочность), М.В. Шахматовым (механические характеристики сварных конструкций) и др.

Определение механических свойств металла стандартными методами часто оказывается невозможным. Неразрушающий контроль прочностных характеристик может быть осуществлен с помощью методов, основанных на внедрении индентора в испытуемый материал. Исследованиями ученых Ю.Г. Артемьева, В.В. Варнелло, Ф.Ф. Витмана, Д.Б. Гогоберидзе, А.А. Гудкова, Н.Н. Давиденкова, А.Н. Динника, М.С. Дрозда, Н.А. Златина, Б.С. Иоффе, Н.А. Кильчевского, В.А. Клочко, М.П. Марковца, Ю.И. Славского, и др., а также зарубежных ученых В. Лизайта, Г.О'Нейля, С. Харди, Д. Тейбора, С. Вильямса и др. решен целый ряд важнейших теоретических и практических задач, связанных с развитием, совершенствованием и практическим использованием этих методов.

Сравнительный анализ, проведенный в работах Ю.Г. Артемьева, Д.Б. Гогоберидзе, А.А. Гудкова, В.А. Клочко, Ю.И. Славского, показал, что приборы ударного действия обладают значительными преимуществами перед статическими, так как характеризуются портативностью и оперативностью контроля, возможностью определения механических свойств на готовых изделиях и конструкциях. Наиболее перспективным из динамических методов является метод, основанный на измерении параметров соударения индентора с объектом испытаний, т.е. на принципе падающего шарика с отскоком.

Отсутствие удовлетворительных алгоритмов обработки сигнала, несущего информацию о процессе удара, не позволяет приборам подобного действия непосредственно измерять такие механические характеристики,



как твердость, вязкость, модуль упругости, пределы текучести, пропорциональности, прочности. Поэтому назрела необходимость решения научной задачи разработки алгоритмов оценки параметров сигнала соударения с учетом природы процесса динамического нагружения индентором материала.

При решении сложных и разнообразных научно-прикладных задач оптимального оценивания и управления при наличии помех трудами многих ученых: А.Н. Колмогорова, Р.Л. Стратоновича, И.А. Больщакова, Н.К. Кульмана, Б.Р. Левина, Р.Ш. Липцера, И.Е. Казакова, М.А. Миронова, В.С. Пугачева, В.Г. Репина, В.И. Тихонова, А.Н. Ширяева, В.И. Ширяева, Г.С. Черноруцкого, В.С. Жабреева, М.С. Ярлыкова, Р.С. Бьюси, Н. Винера, Р. Е. Калмана, Г. Кушнера, Д. Миддлтона, Д. Снайдера, Г. Ван Триса и др. созданы математические методы, представляющие собой суть теории оптимальной фильтрации. Среди них марковская теория оптимальной нелинейной фильтрации Р.Л. Стратоновича ориентирована на нелинейные сигналы и использует метод пространства состояния. Представляется актуальным и возможным решить задачу обработки сигнала соударения индентора с объектом испытаний методами марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации для определения ряда механических характеристик при динамическом нагружении.

**Цель работы.** Разработка алгоритмов оценки ускорения движения ударного индентора и оперативных неразрушающих способов определения основных механических характеристик материалов: твердости, предела текучести, предела пропорциональности, предела прочности, вязкости, модуля упругости.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать математическое описание процесса соударения индентора с материалом при динамическом нагружении с целью установления взаимосвязи между параметрами наблюдаемого процесса и механическими характеристиками материала.
2. Синтезировать алгоритмы фильтрации сигнала датчика ускорения индентора для восстановления значений ударного ускорения, включая особенности поведения материала в областях разрушения, пластических деформаций и упругости.
3. Разработать методы определения механических характеристик по сигналу с датчика ускорения индентора при динамическом нагружении.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач используются методы теории марковской оптимальной нелинейной фильтрации, методы построения алгоритмов оценивания непрерывно-дискретных и дискретных случайных процессов, методы исследования чувствительности оптимальных фильтров к априорной информации и к изменению собственных параметров, математической статистики, моделирования на ЭВМ, определения механических свойств металлов методами регрессионного анализа.

### **Научная и практическая ценность**

1. Алгоритмы нелинейной оценки параметров модели сигнала ударного ускорения индентора в процессе соударения его с объектом испытаний, которые разработаны в двух вариантах: дискретном и непрерывно-дискретном.
2. Алгоритм расчета диаграммы динамического нагружения.
3. Методы определения по диаграмме динамического нагружения следующих прочностных характеристик: твердости, модуля упругости, вязкости, пределов текучести, пропорциональности, прочности.

Поставленная в работе цель исследования является составной частью разработки универсального динамического измерителя, которая осуществлялась на основе хоздоговора №93025 от 18.01.93 с НИЦ "Надежность и ресурс больших систем машин" УрО РАН, а также хоздоговора № 92123 от 10.01.92 с компанией "Транснефть", определившей задачу создания прибора для оперативного измерения механических характеристик значительной и включившей ее в перечень основных работ отраслевого плана. Создание прибора планируется в рамках соглашения о намерениях НИЧ ЧГТУ с предприятием НИИИТ.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на первой региональной конференции "Интеллектуальные информационные технологии и стратегии в системной информатизации Уральского региона" (г. Челябинск, 1994 г.), научно-практической конференции "Информатизация системы образования города" (г. Челябинск, 1996 г.), на научно-технических конференциях ЧГТУ (г. Челябинск, 1995 – 1997 г.), на первом уральском форуме "Культура, искусство, информатизация" (г. Челябинск, 1996 г.), всемирном конгрессе "Информационная математика, кибернетика, искусственный интеллект в информациологии" (г. Екатеринбург, 1996 г.), международной научно-технической конференции "Конверсия, приборостроение, рынок"

(Владимир, Сузdalь, 1997 г.), региональной научно-технической конференции "Новые материалы и технологии в машиностроении" (г.Тюмень, 1997 г.).

**Публикации.** Результаты исследования опубликованы в 6 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (101 наименование) и приложений. Основная часть работы изложена на 121 странице и содержит 31 рисунок, 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируется цель и основные задачи исследования, показана научная новизна диссертации.

**Первая глава.** Задача определения механических характеристик существует в машиностроении, металлургии, химическом и нефтяном аппаратуростроении, при строительстве и эксплуатации мостов, железных дорог, опор электропередач, мобильной техники. При этом необходимо чтобы обеспечивалась оперативность контроля, портативность приборов и возможность определения механических свойств на готовых изделиях и конструкциях в условиях эксплуатации. Этим требованиям удовлетворяют динамические методы и приборы, основанные на измерении кинематических параметров соударения твердосплавного шарика (индентора) с исследуемым материалом. Однако в этом случае процесс соударения представляет собой быстропротекающий процесс, что затрудняет оценку механических характеристик.

К наиболее совершенному типу приборной реализации динамического метода следует отнести измеритель ударного действия (рис. 1). Изменение механических характеристик производится путем нанесения удара индентора по испытуемому материалу. Во время взаимодействия между ними возникает ударный импульс, который регистрируется пьезоэлектрическим датчиком ускорения и преобразуется на выходе в электрический сигнал  $\ddot{z}(t)$  (рис. 2). Этот сигнал представляет собой изменение ускорения во времени, а следовательно отражает реакцию материала на внедрение и отторжение индентора. Далее сигнал поступает по соединительным проводам в микропроцессорную часть прибора, где выполняют

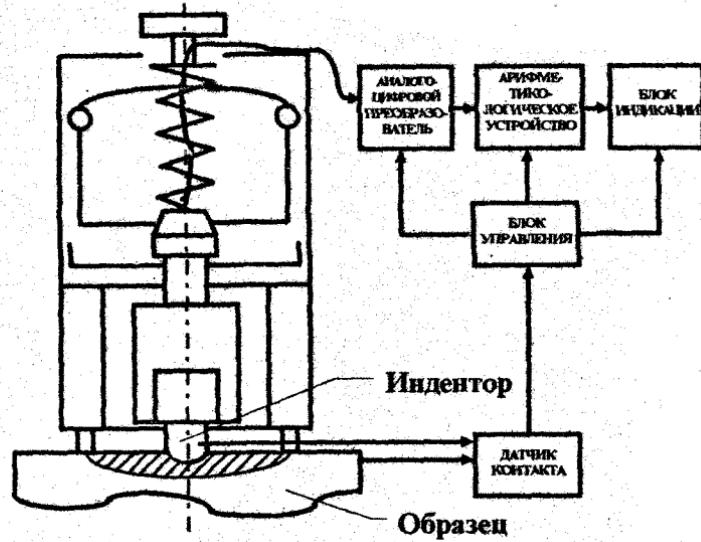


Рис. 1. Схема динамического измерителя

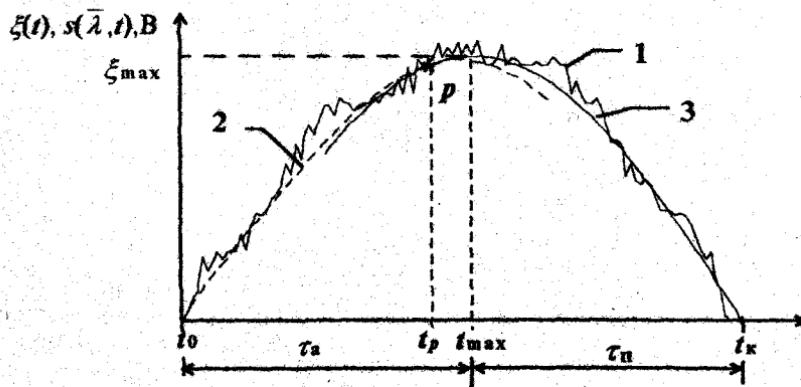


Рис. 2. Вид сигнала датчика ускорения индентора и полезного сигнала:

1 — сигнал с датчика ускорения; 2 — модель сигнала на активном этапе;  
3 — модель сигнала на пассивном этапе

ся алгоритмы обработки сигнала с целью получения значений механических характеристик по кривой ударного ускорения.

Однако восстановление кривой ускорения по сигналу с датчика проблематично из-за сложного характера процесса соударения и существенных искажений сигнала, обусловленных помехами датчика.

Для выделения сигнала используют фильтр нижних частот, который искажает сигнал в его высокочастотной части. Это приводит к потере деталей в записи ударного процесса, а именно, скачкообразных изменения в зоне пределов текучести и пропорциональности. Известные динамические методы осуществляют аппроксимацию сигнала типовыми функциями. Эти аппроксимации малоинформативны, так как позволяют определить максимальное значение ударного ускорения  $a_{max}$ , длительность фронта  $t_{max}$  или длительность действия ударного процесса  $t_k$ , по которым судят о твердости, а локальные изменения в зонах разрушения, пластических и упругих деформаций не выявляются. Более того, эти аппроксимации по сравнению с реальным характером изменения ударного процесса не имеют на границе между окончанием пластической и начальном упругой деформации скачка производной ускорения, который хорошо наблюдается при статическом нагружении индентора.

В работе предложено участки, между которыми имеется скачек производной ударного ускорения (точка  $p$  на рис. 2), аппроксимировать различными функциями с несколькими информационными параметрами. На активном участке левее точки  $p$  кривую ускорения аппроксимируем полигармонической функцией, так как здесь форма сигнала не известна из-за пластических деформаций и разрушения материала. При этом количество параметров функции может быть выбрано исходя из числа точности и количества оцениваемых показателей прочности. Начиная с точки  $p$  кривую ударного ускорения аппроксимируем моногармонической функцией, так как этот участок определяется упругими деформациями.

Модель сигнала ударного ускорения (полезного сигнала) имеет вид

$$\ddot{a}(\bar{\lambda}, t) = \sum_{j=1}^K [\alpha_{1j} \sin(\alpha_{3j} t) + \alpha_{2j} \cos(\alpha_{3j} t)], \quad (1)$$

$$K=3 \text{ при } t_0 \leq t < t_p; \quad K=1 \text{ при } t_p \leq t \leq t_k,$$

где  $\bar{\lambda} = \{\lambda_i, i=1, r\}$  —  $r$ -мерный информационный вектор параметров функции  $\ddot{a}(\bar{\lambda}, t)$ , компоненты которого равны  $\lambda_1 = \alpha_{11}$ ,  $\lambda_2 = \alpha_{21}$ , ...

Кроме того, применять аппроксимацию к зашумленному сигналу с датчика ускорения нецелесообразно, так как при этом одновременно с

полезным сигналом, несущем информацию о ударном процессе, будут вносится погрешности из-за неполной фильтрации помех датчика.

Поскольку электрический сигнал датчика формируется с помощью пьезоэлектрического элемента, который используется в линейном диапазоне, то примем допущение о аддитивности полезного сигнала и помех.

Таким образом, необходимо синтезировать алгоритмы оценки параметров модели полезного сигнала  $s(\bar{\lambda}, t)$  по сигналу с датчика ускорения индентора, которые позволили бы восстановить значения ускорения, включая особенности поведения материала в локальных зонах пределов текучести, пропорциональности, прочности, при этом были бы легко реализуемы на ЭВМ.

**Вторая глава.** Учитывая, что модель полезного сигнала нелинейна, оцениваемые параметры случайные величины, то для решения поставленной задачи целесообразно применять марковскую теорию оптимальной нелинейной фильтрации, разработанную Р.Л. Стратоновичем. Это объясняется тем, что в методах марковской фильтрации для всех случайных процессов используется представление в пространстве состояния, отсутствует требования линейности и они разработаны для гармонического вида сигналов.

Вследствие временного квантования образуется дискретный векторный процесс  $\bar{\lambda}_m = \bar{\lambda}_i$ , ( $\lambda_{im} = \lambda_i$ ). Оптимальная оценка параметров информационного вектора  $\bar{\lambda}_m^*$  соответствует математическому ожиданию апостериорной плотности вероятности

$$\bar{\lambda}_m^* = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \lambda p(\lambda, t_m | \xi_m) \prod_{i=1}^r d\lambda_i. \quad (2)$$

Уравнения марковской нелинейной непрерывно-дискретной фильтрации для решаемой задачи оценивания имеют вид

$$\bar{\lambda}_{im}^* = \bar{\lambda}_{i,m-1}^* + A_{im} v_{im}, \quad (3)$$

$$k_{ijm} = k_{ij,m-1} - A_{im} C_{jm}, \quad (4)$$

где использованы обозначения:

$$A_{im} = \frac{1}{b} \sum_{q=1}^r k_{iq,m-1} \left. \frac{\partial s}{\partial \lambda_q} \right|_{\bar{\lambda}_{m-1}^*}; \quad C_{jm} = \sum_{q=1}^r k_{qj,m-1} \left. \frac{\partial s}{\partial \lambda_q} \right|_{\bar{\lambda}_{m-1}^*}; \quad (5)$$

$$v_{im} = \xi_m - s(\bar{\lambda}_{m-1}^*, t_m) - b_1/2; \quad b = N_g + b_2 + b_3/2; \quad (6)$$

$$b_1 = \sum_{p=1}^r \sum_{q=1}^r k_{pq,m-1} \frac{\partial^2 s}{\partial \lambda_p \partial \lambda_q} \Bigg|_{\bar{\lambda}_{m-1}^*}; \quad b_2 = \sum_{p=1}^r \sum_{q=1}^r \frac{\partial s}{\partial \lambda_p} k_{qp,m-1} \frac{\partial s}{\partial \lambda_q} \Bigg|_{\bar{\lambda}_{m-1}^*}; \quad (7)$$

$$b_3 = \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^r \sum_{p=1}^r \sum_{q=1}^r \frac{\partial^2 s}{\partial \lambda_k \partial \lambda_l} k_{lp,m-1} k_{kq,m-1} \frac{\partial^2 s}{\partial \lambda_p \partial \lambda_q} \Bigg|_{\bar{\lambda}_{m-1}^*}, \quad j=\overline{1,K}, \quad m>1. \quad (8)$$

Оптимальный фильтр, построенный по уравнениям (3)–(8) (см. рис. 3), представляет собой многоканальную замкнутую систему автоматического регулирования, на выходе которой формируются оценки компонент информационного вектора  $\bar{\lambda}_m$  с минимально возможными дисперсиями  $k_{ijm}$ .

Нередко количество наблюдений значений сигнала с датчика  $\{\xi_m\}$  избыточно для обеспечения необходимой точности определения параметров. Методы оптимальной нелинейной дискретной фильтрации позволяют найти оценку вектора информационных параметров без учета информации о процессе между наблюдениями.

В работе разработан алгоритм оптимальной нелинейной дискретной оценки параметров полезного сигнала датчика ускорения индентора в виде следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{1jm}^* &= \dot{\alpha}_{1j,m-1} + k_{1jm} \tilde{\sigma}^{-2} \{ \xi_m - \sum_{j=1}^K [\dot{\alpha}_{1j,m-1}^* \sin(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}) + \\ &+ \dot{\alpha}_{2j,m-1}^* \cos(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1})] \} \sin(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}); \\ \dot{\alpha}_{2jm}^* &= \dot{\alpha}_{2j,m-1} + k_{2jm} \tilde{\sigma}^{-2} \{ \xi_m - \sum_{j=1}^K [\dot{\alpha}_{1j,m-1}^* \sin(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}) + \\ &+ \dot{\alpha}_{2j,m-1}^* \cos(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1})] \} \cos(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}); \\ \dot{\alpha}_{3jm}^* &= \dot{\alpha}_{3j,m-1} + k_{3jm} \tilde{\sigma}^{-2} \{ \xi_m - \sum_{j=1}^K [\dot{\alpha}_{1j,m-1}^* \sin(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}) + \dot{\alpha}_{2j,m-1}^* \cos(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1})] \} \times \\ &\times \{ \dot{\alpha}_{1j,m-1}^* \cos(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}) - \dot{\alpha}_{2j,m-1}^* \sin(\alpha_{3j,m-1}^* t_{m-1}) \}; \\ k_{njm}^* &= k_{nj,m-1} [1 + \tilde{\sigma}^{-2} (s_m (\alpha_{nj,m-1}^* t_m))^2 k_{nj,m-1}]^{-1}, \quad n=\overline{1,3}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Фильтр, синтезированный на основе уравнений (9) (см. рис. 4), формирует оценочные значения всех параметров  $\alpha_{nim}^*$  информационного вектора по сигналу с датчика ускорения.

В третьей главе было проведено цифровое моделирование. Необходимость такого исследования вызвана тем, что точное описание математических моделей сигнала и помех не представляется возможным из-за

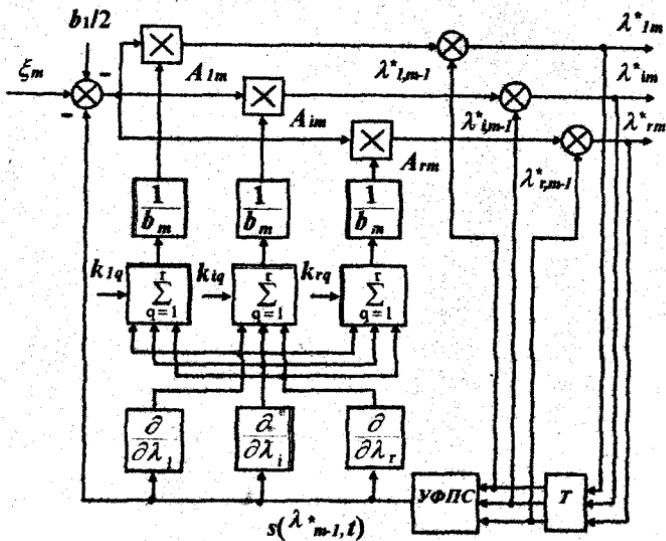


Рис. 3. Структурная схема устройства оптимальной непрерывно-дискретной оценки параметров сигнала датчика ускорения:

УФПС — устройство формирования полезного сигнала;  
 $T$  — блок задержки времени

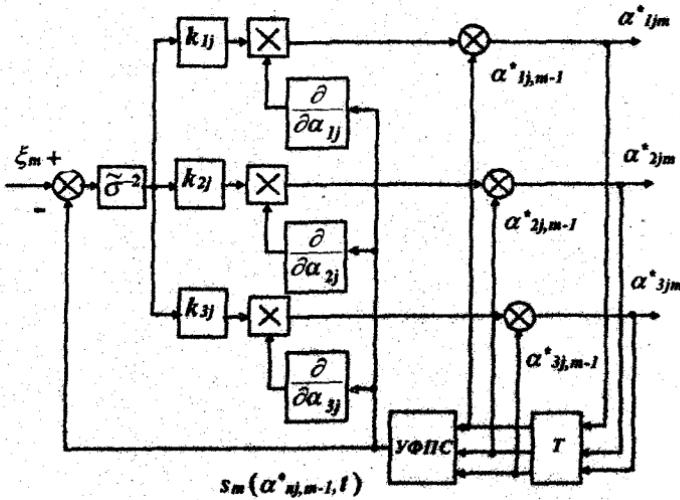


Рис. 4. Структурная схема устройства оптимальной дискретной оценки информационных параметров сигнала датчика ускорения

недостатка экспериментальных данных, получить которые весьма сложно, а также из-за стремления использовать ряд допущений при синтезе оптимальных фильтров, которые позволяют формировать рациональные математические модели процессов, алгоритмы обработки которых могут быть эффективно реализованы с помощью современной аппаратуры. Кроме того, в реальных условиях параметры входных воздействий фильтра под влиянием различных факторов могут изменяться в довольно широких пределах.

При исследовании чувствительности алгоритмов к изменению параметров выходного сигнала датчика выясено, что при увеличении амплитуд гармонических составляющих на 20% квадрат отклонения расчетного от истинного значения параметров кривой ударного ускорения  $\delta_{ii}$  при непрерывно-дискретной оценке увеличивается в 1,5...2 раза (см. рис. 5).

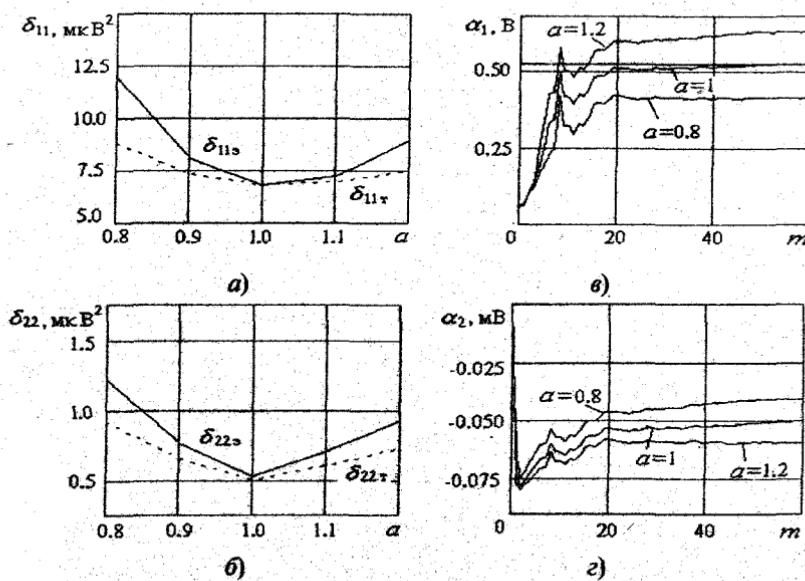


Рис. 5. Графики, характеризующие чувствительность непрерывно-дискретного алгоритма к отклонениям параметров входных воздействий от расчетного значения:

$\delta_{ii\text{э}}$  — экспериментальное значение;

$\delta_{ii\text{т}}$  — теоретическое значение

В работе оценена чувствительность алгоритмов к уровню помех датчика ускорения для дискретного и непрерывно-дискретного варианта. Выяснено, что при изменении собственных параметров алгоритмов проигрыш в точности оценки более заметен, чем при изменении характеристик выходного сигнала датчика ускорения.

Представленный расчет дает возможность определить пределы диапазона измеряемых характеристик исходя из заданной точности.

В четвертой главе было показано, что разработанные алгоритмы оценки сигнала датчика ускорения позволяют установить взаимосвязь между механическими характеристиками и восстановленной кривой ударного ускорения индентора. Наличие такой связи утверждается и доказывается в ряде работ Ю.Г. Артемьева, В.А. Ключко, Д.М. Беленько-го, посвященных исследованию динамических процессов соударения индентора с материалом при неразрушающем контроле механических характеристик. Ими были экспериментально получены в виде уравнений регрессии корреляционные связи между каждым механическим свойством и характеристиками кривой ударного взаимодействия: величиной углубления, максимальной скоростью, максимальным ускорением и временем процесса внедрения. Таким образом, подтверждена функциональную взаимосвязь, но вид этой связи не был установлен.

Следовательно, регрессионный метод не несет физического смысла так, как например диаграмма, устанавливающая связь между напряжением  $\sigma$  и удлинением  $\Delta l$  при испытании на растяжение образца (см. рис. 6,а), которая хорошо известна и лежит в основе инженерных расчетов на прочность. При статическом внедрении индентора в поверхность материала М.П. Марковец предложил строить диаграмму вдавливания в координатах напряжение  $H$  деформация  $\psi$  в лунке. Эта диаграмма имеет такой же вид, что и диаграмма растяжения, т.е. имеет те же характеристические точки (см. рис. 6,б).

Полученные в работе алгоритмы нелинейной оценки параметров кривой ударного ускорения, а также наличие измерительного прибора позволяют построить диаграмму нагружения при динамическом режиме.

Отфильтрованный методами оптимальной нелинейной фильтрации сигнал с датчика ускорения индентора пропорционален ударному ускорению  $a(t)$ , а следовательно — контактному усилию и позволяет определить глубину внедрения  $l$  путем его двукратного интегрирования, а также напряжение  $H$  в лунке путем деления контактной силы между инден-

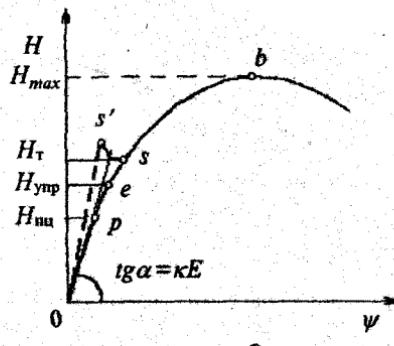
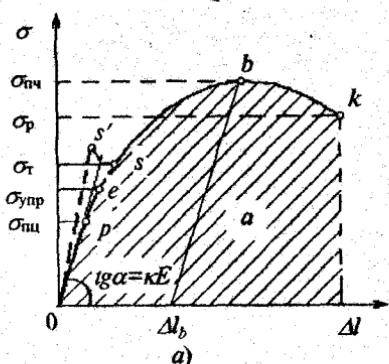


Рис. 6. Схематические диаграммы:

а) при растяжении образца; б) статическое вдавливание индентора

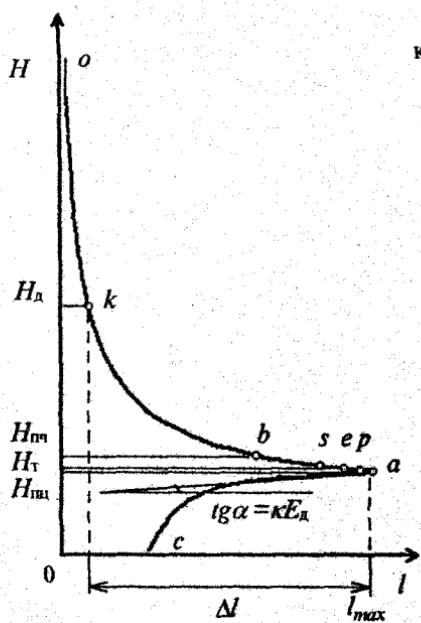


Рис. 7. Схематическая диаграмма динамического внедрения индентора

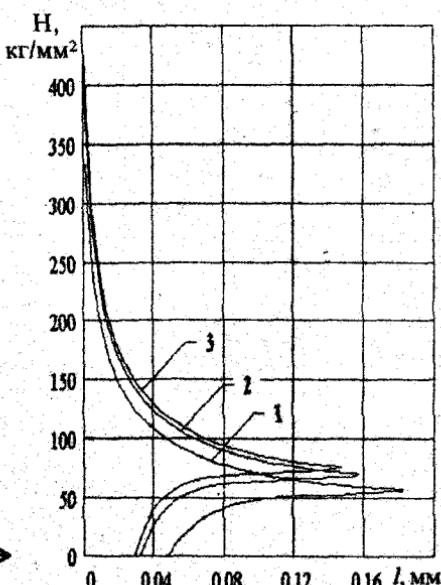


Рис. 8. Диаграмма, построенная по результатам эксперимента:

1 — без нагрузки; 2 — нагрузка 20 кг;  
3 — нагрузка 40 кг

тором и материалом на площадь шарового сегмента, соответствующего диаметру лунки.

Расчитанная диаграмма динамического нагружения  $H(l)$  (см. рис. 7) охватывает на активном этапе удара (участок  $oa$ ) области разрушения (участок  $ok$ ), больших пластических деформаций (участок  $bs$ ), малых пластических деформаций (участок  $sp$ ) и упругую область (участок  $ra$ ); пассивный этап удара (участок  $ac$ ) обусловлен чисто упругими деформациями восстановления.

В работе разработаны методы определения по диаграмме динамического нагружения следующих прочностных характеристик: динамической твердости  $H_d$ , модуля упругости  $E_d$ , ударной вязкости  $a_d$ , динамических пределов текучести  $H_t$ , упругости  $H_{up}$ , пропорциональности  $H_{pc}$ , прочности  $H_{pr}$ .

На основе разработанной методики была проведена оценка прочностных характеристик материала по результатам экспериментального исследования. Для этого экспериментальные данные были обработаны по предложенными А.Е. Кубаревым и Л.Х. Аннабердиевым (Государственная академия строительства, Ростов-на-Дону) корреляционными уравнениями и путем построения диаграммы динамического нагружения (см. рис. 8).

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о достоверности теоретических расчетов, включая алгоритмы фильтрации сигнала датчика ускорения индентора и методы определения прочностных свойств материала по предложенной кривой динамического нагружения, которые могут быть рекомендованы для применения на практике с относительной погрешностью 4...5%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- Получены алгоритмы нелинейной оценки параметров ударного ускорения индентора в процессе соударения его с объектом испытаний. Особенностью алгоритмов является то, что при их синтезе кривая ударного ускорения разделена на два участка: первый, включающий время от момента касания индентора поверхности материала до момента окончания пластического деформирования; второй участок — от прекращения пластического деформирования до момента отскакивания индентора. Участки аппроксимируются различными полигармоническими функциями. При этом задача восстановления формы ударного ускорения завершается оценкой параметров полигармонических функций путем исполь-

0301271

зования марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации. Это позволило получить математическую модель реального ударного ускорения индентора, которая на границе двух участков характеризуется скачком производной, что не выявляется известными видами аппроксимации ударного процесса; сохранить локальные изменения реального ударного процесса в зонах пределов пропорциональности, упругости, текучести, прочности; повысить точность оценки механических характеристик.

2. Цифровое моделирование показало, что при изменении собственных параметров алгоритмов оценки проигрыш в точности фильтрации более заметен, чем при изменении характеристик выходного сигнала датчика ускорения. При исследовании чувствительности алгоритмов к уровню помех датчика ускорения выяснено, что при интенсивности шума 0.001 В<sup>2</sup> относительная погрешность оценки параметров кривой ударного ускорения при дискретной фильтрации сигнала составляет для амплитуды  $\alpha_1 = 2\%$ , амплитуды  $\alpha_2 = 1.8\%$ , частоты  $\alpha_3 = 2.2\%$ . Время переходного процесса в основном зависит от шага дискретизации и в случае непрерывно-дискретной оценки параметров заметно меньше, чем при дискретной.

Представленный расчет позволяет определить пределы диапазона измеряемых характеристик исходя из заданной точности.

3. Осуществлен алгоритм расчета диаграммы динамического нагружения, заключающийся в том, что восстановленная модель ударного ускорения, пропорционального контактной силе, дважды интегрируется для определения перемещения индентора в материале, вычисляется текущая площадь шарового сегмента, соответствующего диаметру лунки, и определяется напряжение как отношение контактной силы к площади.

4. Разработаны методы определения по диаграмме динамического нагружения ряд прочностных характеристик:

*Динамическую твердость* оценивают по нагрузке, при которой появляется отклонение диаграммы динамического нагружения от начального прямолинейного участка. *Динамический предел пропорциональности* определяют по диаграмме динамического нагружения в момент времени максимального значения ускорения, при котором соприкасаются аппроксимирующие активный и пассивный этапы функции. *О динамических пределах упругости и текучести* судят по напряжениям на диаграмме динамического нагружения, при которых углубление достигает заданной величины: 0.05% и 0.2% соответственно от максимального углубления индентора. По значению напряжения в точке перехода кри-

волинейного участка диаграммы динамического нагружения в прямолинейный участок судят о *динамическом пределе прочности*. Ударная вязкость определяется площадью под кривой нагружения на активном этапе удара за исключением области разрушения. Модуль упругости находится по углу наклона кривой динамического нагружения на этапе упругого разгружения в его начальной стадии.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Рыжкова И.А. Информационная система обработки данных по оценке напряженности конструкционных материалов // Первая региональная конференция "Интеллектуальные информационные технологии и стратегии в системной инфоматизации Уральского региона" (Челябинск, 26-29 октября 1994 г.): Тез. докл. — Челябинск: ЧГТУ, 1994. —Ч.2. —С.75-76.
2. Жабреев В.С., Чапцов Р.П., Рыжкова И.А. Пример продвижения интеллектуальных информационных средств обработки физических экспериментов при исследовании механических характеристик материалов и конструкций в практику образовательных процессов средних школ //Научно-практическая конференция "Информатизация системы образования города" (Челябинск, 26-29 октября 1996 г.): Тез. докл. — Челябинск: РУО МАИ, 1996. —С. 31.
3. Рыжкова И.А. Алгоритмы оценки параметров быстропротекающих процессов и их применение для разработки интеллектуального прибора // Информационная проблематика нечетких технологий: Тез. докл. — Екатеринбург: РУО МАИ, 1996. —С.98-99.
4. Жабреев В.С, Рыжкова И.А. Контроль характеристик материалов и конструкций // Междунар. научн-технич. конф. "Конверсия, приборостроение, рынок" (Владимир, Сузdalь, 14-16 мая 1997 г.): Тез. докл. — Владимир: ВлГУ, 1997 г. —С.46-47.
5. Рыжкова И.А. Контроль механических характеристик материалов и конструкций в машиностроении // Регион. научн.-технич. конф. "Новые материалы и технологии в машиностроении" (Тюмень, 19-21 ноября 1997 г.): Тез. докл. — Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. —С.63-64.
6. Рыжкова И.А. Алгоритм нелинейной нерперывно-дискретной фильтрации сигнала датчика ускорения индентора // Системы обработки информации и управления: архитектура и программное обеспечение: Тем. сб. научн. трудов. — Челябинск: ЮУрГУ, 1998. —С. 56-59. (Находится в печати).