В. М. Мусалимов, В. А. Валетов

Динамика фрикционного взаимодействия



Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

В. М. Мусалимов, В. А. Валетов

Динамика фрикционного взаимодействия



Санкт-Петербург 2006 Санкт-Петербург 2006 Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия.- СПб: СПбГУ ИТМО,2006.-191 с.:илл.

В монографии рассматриваются новые подходы к исследованию процессов и явлений, имеющих место при контактировании подвижных элементов машин и приборов. Опираясь, в основном, на экспериментальную базу, авторы отразили свой опыт исследования фрикционного взаимодействия с использованием современных компьютерных технологий- это оригинальные программы оцифровки экспериментальных данных; пакеты программ анализа, идентификации и моделирования систем (MATLAB);пакеты программ Wavelet Toolbox; программы фрактального анализа. Рассмотрены вопросы оптимизации микрогеометрии контактирующих поверхностей.

Рецензенты:

доктор технических наук Фадин Ю.А.(ИПМаш РАН)

профессор Ю.Г. Мурашев (СПб БГТУ «Военмех»)

ISBN 5-7577-0285-0

©Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006

© Мусалимов В.М., Валетов В.А., 2006

Оглавление

Введение7
ЧАСТЬ 1. Внешняя и внутренняя динамика
системы «Трущиеся поверхности»9
Глава 1. Идентификация процесса трибологического
взаимодействия10
1.1.Устройство для трибологических исследований10
1.2. Методика проведения экспериментальных
исследований на мехатронной
установке «Трибал»11
1.3.Методика анализа и обработки
экспериментальных данных13
1.3.1.Анализ, идентификация и моделирование систем
(внешняя динамика)13
1.3.2.Обработка экспериментальных данных
с помощью System Identification Toolbox16
1.3.3.Оценка качества поверхности28
1.3.4.Оценка качества поверхности по результатам
быстрого преобразования Фурье
1.3.5. Результаты непрерывного одномерного
вейвлет-преобразования34
1.3.6. Результаты дискретного одномерного
вейвлет-преобразования35
1.3.7.Анализ с использованием вейвлета Добеши db437
Глава 2. Автоматизация контроля качества
поверхности трибопар
2.1.Динамические характеристики системы
2.1.2.Автокорреляционная и взаимнокорреляционная
функции
2.1.3.Спектральные характеристики41
2.1.4.Переходные характеристики41
2.1.5.Частотные характеристики
2.2.Сопоставление эволюции динамических
характеристик и эволюции качества трущихся
поверхностей43
2.3.Выверенные динамические характеристики
Глава З. Стохастический анализ шероховатости
поверхности74
3.1. Методы вычисления стохастических
характеристик74
3.1.1. Требования к исходным данным

3.1.2.Восстановление аттрактора по временному
(пространственному) ряду
3.1.3.Выбор временной задержки (сдвига)
3.1.4. Алгоритм вычисления корреляционной
размерности аттрактора77
3.1.5.Алгоритм вычисления корреляционной
энтропии аттрактора78
3.1.6.Построение динамической модели
по экспериментальным данным
3.2.Обработка экспериментальных данных
с помощью программы Fractan80
3.2.1.Стохастический анализ профилограммы 31282
3.3.Пример последовательного вейвлет-
фрактального анализа профилограммы
3.3.1. Многоуровневый вейвлет-анализ
профилограмм
3.3.2. Фрактальный анализ (внутренняя динамика
сигнала)
3.3.3.Управляющии параметр аттрактора Лоренца
1 лава 4. Аналитическая теория трения
4.1.1 Стоточное состоятист
4.1.2 Кудочово трочио
4.1.5. Квадратичное сопротивление
4.1.5. Пинейное и кулоново трение
4.1.5. Линейное и кулоново трение
4.1.5.Сухос трепие
4 2 1 Сухое трение 102
4.2.2.Вязкое трение
4.2.3.Квалратичное сопротивление 104
4.3.Методы теории катастроф106
4.3.1.Бифуркация Хопфа106
4.3.2.Синтез нелинейной силы трения
Литература к ЧАСТИ 1111
тасто 2. тикрогеометрия поверхностей деталей и их
1 1 Стационалность миклогеометрии поверуностей 110

1.2.Дискретизация и фильтрация профилей	
поверхностей	
1.2.1.Дискретизация профиля122	
1.2.2.Фильтрация профиля123	
1.3.Оптимизация микрогеометрии поверхностей127	
1.3.1. Методика определения оптимальной	
микрогеометрии для конкретного	
функционального свойства поверхности	
1.3.2. Методика технологического обеспечения	
микрогеометрии	
1.3.3. Методика контроля оптимальной	
микрогеметрии с использованием	
непараметрических критериев130	
1.3.4. Методика нормирования микрогеометрии	
поверхности поверхностей с использованием	
непараметрических критериев131	
1.4.Обоснование целесообразности внедрения	
непараметрических методов оценки и контроля	
микрогеометрии поверхностей деталей	
1.5.Условия практической применимости	
непараметрических критериев132	
1.6. Методика получения безразмерного профиля134	
1.7.Экономические аспекты оптимизации	
микрогеометрии поверхности135	
Глава 2. Экспериментальная проверка эффективности	
непараметрических методов оценки и	
контроля микрогеометрии поверхностей137	
2.1. Исследование взаимосвязи микрогеометрии и	
функциональных свойств поверхности137	
2.2.Особенности оценки микрогеометрии продольно	
шлифованных поверхностей143	
2.3.Влияние исходной шероховатости поверхности	
на коэффициент трения качения и	
долговечность роликовых направляющих148	
2.4.Влияние исходной шероховатости поверхности	
на приработку зубчатых колес167	
2.5.Исследование изменения микрогеометрии	
поверхностей функциональных деталей	
судовых дизелей в процессе их приработки и	
эксплуатации1/0	
2.5.1. методика исследования170	

2.5.2. Исследования изменения микрогеометрии	
поверхностей деталей дизелей1	L71
2.5.3.Изменения микро- и макрогеометрии	
рабочих деталей ЦПГ В процессе испытания	
дизелей1	82
Литература к ЧАСТИ 21	.84

Введение

В монографии излагаются новые подходы к оценке фрикционного взаимодействия трушихся поверхностей. Это, с одной стороны, модельные оценки трибологического процесса, когда узел трения рассматривается как объект автоматического регулирования. С другой стороны, непараметрические оценки качества трушихся поверхностей. Каждая из этих сторон имеет приборное оснащение. Установка «Трибал» позволяет в непрерывном режиме времени получать динамические характеристики узла трения и, таким образом, отслеживать их эволюцию. Установка «Калибр» позволяет получать одномерные профилограммы. Параллельное их использование позволяет устанавливать корреляцию динамические характеристики- качество трушихся поверхностей. Таким образом, указанная пара приборов дает возможность поставить и решить задачу автоматизированного контроля качества поверхности, то есть решить проблему её мониторинга.

В основу монографии, в основном, положен цикл экспериментальных и теоретических работ авторов. Здесь проанализирована серия экспериментов по исследованию эволюции трибологического взаимодействия трибопар в режиме трения скольжения; осуществлен анализ взаимодействия на протяжении всего цикла экспериментальных работ с использованием компьютерных технологий, предоставляемых пакетом Identification Matlab; синтезирована нелинейная динамическая система, соответствующая исследуемому процессу. В качестве экспериментальной базы была задействована трибометрическая система «Трибал», которая включает в себя нижнюю платформу с закрепленным на ней образцом трибопары. Входом динамической системы трущихся поверхностей являются циклические возвратнопоступательные перемещения нижней платформы. Выходом является динамическая составляющая силы трения, которая регистрируется при фрикционном движении контробразца, закрепленного на верхней платформе. Для обеспечения физической реализуемости системы и её идентификации было принято, что на каждом из интервалов времени система может быть представлена моделями линейных систем управления, - проводится так называемое модельное сшивание пространства состояний (МСПС). Далее также

было принято, что эволюция динамической системы определяется эволюцией качества трущихся поверхностей. В процессе испытаний систематически проводились оценки динамических моделей с одновременной оценкой качества поверхностей, соответствующих процессу тренияизнашивания; на каждом из этапов идентифицировались две системные характеристики: импульсная переходная и единичная переходная функции.

ЧАСТЬ 1

ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ДИНАМИКА СИСТЕМЫ «ТРУЩИЕСЯ ПОВЕРХНОСТИ»

Глава 1 Идентификация процесса трибологического взаимодействия

1.1. Устройство для трибологических исследований

Кафедрой Мехатроники СПбГУ ИТМО разработано устройство для экспериментального определения трибологических описанное в авторском свидетельстве [8,24]. Здесь испытуемые образцы осуществляют возвратнопоступательные движения относительно друг друга, измерительная система регистрирует перемещения контробразцов, закрепленных на платформах. Общая схема устройства приведена на (рис.1.1).



Рис. 1.1. Схема устройства для определения трибологических характеристик трущихся элементов конструкций

На основании 1 закреплены две направляющие 2, по которым движется ползун (платформа) 3. К ползуну жестко крепится держатель 4 образца 5. Держатель 7 образца 6 нагружается через шарикоподшипники 22 нагрузочной площадки 10 винтовым домкратом 14 определенной нагрузкой, измеряемой динамометром 16. Нагружение производится двигателем 17, закрепленным на стойке 15. Перемещение нижнего держателя осуществляется двигателем 19 с помощью шатунно-кривошипного механизма 18 и регистрируется датчиком-индикатором 11 с помощью щупа 8, жестко соединённого с держателем 4. Сила трения, действующая на образцы, измеряется датчиком-индикатором 12, закрепленным на стойке 13. Информация с датчиков 11, 12 вводится в персональный компьютер 20.

Платформа представляет собой тележку на четырех катках 21, передвигающихся по направляющим 2. Платформа служит для закрепления на ней нижнего держателя 4 образца 5 и в тоже время является ползуном в кривошипношатунном механизме, обеспечивающем ей возвратнопоступательное движение.

Верхний держатель 7 связан щупом 9 с датчикаиндикатора 12, который закреплен на стойке 13. За счет сил трения между испытуемыми образцами верхний держатель может совершать возвратно-поступательные движения с проскальзыванием или без проскальзывания относительно нижнего держателя образцов.

Вертикальная нагрузка на образцы создается винтовым домкратом 14 (рис. 1.1), приводимым в движение реверсивным двигателем 17 через червячную передачу. Нагрузка фиксируется динамометром 16. Площадка 10, которая передает нагрузку на верхний держатель образцов, имеет катки 22 для того, чтобы верхний держатель 7 имел возможность двигаться за счет сил трения между испытываемыми образцами.

1.2. Методика проведения экспериментальных исследований на мехатронной системе «ТРИ-БАЛ»

Трибологические исследования на кафедре мехатроники СПбГУИТМО начались с экспериментальных исследований надежности кабельных конструкций. Первые исследования в данной области были проведены в начале 90-х годов. Было разработано устройство для испытания материалов на трение, которое имитировало условие взаимодействия элементов гибких кабелей, приближенное к реальным условиям. Держатели образцов обеспечивали расположение элементов, аналогичное их расположению относительно друг друга в самом кабеле.

Устройство было снабжено аналоговой регистрирующей аппаратурой, куда подавались сигналы от двух датчиков.

Первый датчик измерял усилие взаимодействия F между элементами, другой - перемещение нижнего образца Δ.

При одновременной работе двух датчиков строились диаграммы F-Δ, а при отключении одного из них получали закон изменения скорости, перемещения и силы во времени. Все эти диаграммы снимались с осциллографа на бумажный носитель и затем подвергались обработке.

Основной задачей при обработке экспериментальных данных являлось определение коэффициентов демпфирования трибологической системы.

Экспериментальная база для испытания трибологических пар элементов кабельных конструкций позволяла создавать окна свободных затухающих колебаний и соответственно получать экспериментальные данные для вычисления характеристик упругости и вязкости трибологических пар, в том числе в критических точках[9,10].

Такая методика позволяла оценивать значения коэффициентов демпфирования и их точности для любых типов исследуемых кабелей.

В то же время было очевидно, что данную установку необходимо модернизировать, потому что:

• анализ и обработка велись только на основании выходных данных;

• не производилось сопоставление полученных характеристик с качеством поверхности, т.е. не рассматривались профилограммы поверхности испытываемых образцов;

• был трудоемок и с низкой скоростью процесс обработки экспериментальных данных;

• была невысокая точность измерений, связанная с необходимостью обработки информации на бумажном носителе.

Указанная ниже <u>методика проведения трибологического</u> эксперимента была аппробирована в течение последних лет при снятии динамических характеристик для пар трения сплав CuAl10Ni, стекло-стекло, сталь-сталь и других материалов:

1. Подготовка образцов пластин со сформированной шероховатостью поверхности

2. Снятие профилограммы (верхней и нижней пластины)

3. Закрепление пластин в держателях 6 и 7 (рис. 1.1)

4. Силовое нагружение винтовым домкратом 14 (рис. 1.1)

5. Приведение в движение нижней платформы. Частота колебаний изменяется от 1 до 5 Гц. Амплитуда колебаний нижнего образца устанавливается в пределах от 1 до 4 мм.

6. Реализация процесса трения с проскальзыванием в течение определённого промежутка времени.

7. Остановка процесса и снятие образцов (получение профилограмм)

8. Повтор п. 2 – 7.

9. Импорт .dat файлов с экспериментальными данными в систему MATLAB.

10. Идентификация процесса трения с помощью пакета System Identification Toolbox.

11. Определение динамических характеристик процесса:

- автокорреляционной и взаимно корреляционной функций;
- спектральных характеристик;
- переходных характеристик;
- частотных характеристик.

12. Оценка качества поверхности с помощью снятых профилограмм.

• построение спектрограмм (быстрое преобразование Фурье)[7];

- построение вейвлетограмм[7];
- фрактальный анализ[17,20]

13. Сопоставление динамических характеристик с качеством поверхности и анализ результатов[22,23].

Модернизированное устройство базировалось на новых мехатронных технологиях[24].

1.3. Методика анализа и обработки экспериментальных данных

1.3.1. Анализ, идентификация и моделирование систем

В теоретических и экспериментальных исследованиях широко используются различные модели, которые применяются либо для изучения механизма явлений, происходящих в системах и объектах, либо для прогнозирования их функционирования. В данной работе решается задача создания модели процессов трения трибопары. Под моделью обычно понимается выраженная в той или иной форме информация о наиболее существенных характеристиках объекта. По способу представления данной информации выделяют следующие типы моделей:

• словесные или вербальные модели;

• физические модели (уменьшение копии реальных объектов, иногда другой физической природы, позволяющие имитировать процессы в исследуемом объекте);

• математические модели (информация об исследуемом объекте или системе представляется в виде математических терминов).

Аналитические модели представляют собой отражение взаимосвязей между переменными объекта в виде математической формулы или группы таких формул.

Моделирование основано на двух основополагающих признаках:

 на принципе практической ограниченности количества фундаментальных законов природы;

• на принципе подобия, означающем, что явления различной физической природы могут описываться одинаковыми математическими зависимостями.

Процедуру построения модели принято называть идентификацией, при этом данный термин обычно относится к построению аналитических математических моделей динамических объектов. Идентифицируемый объект представим в виде, показанном на (рис.1.2), где t-время; u(t) – контролируемый (управляемый) входной сигнал; $\tilde{y}(t)$ – теоретический выход объекта; e(t) –случайная помеха, отражающая действие не учитываемых факторов (шум наблюдения).



Рис. 1.2. Общее представление идентифицируемого объекта

Связь между выходным и «теоретическим» входным сигналом задается некоторым оператором Ψ :

$$y(t) = \Psi[u(t)].$$

Тогда наблюдаемый выход объекта может быть описан соотношением:

$$y(t) = \Psi[u(t)] + e(t)$$

Цель идентификации: на основании наблюдений за входным u(t) и выходным y(t) сигналами на каком-то интервале времени определить вид оператора, связывающего входной и теоретический выходной сигналы.

В трибологических исследованиях измерение сигналов с датчиков производится в дискретные моменты времени t_k = (где T- интервал дискретизации), что представляет определенное удобство при последующей обработке данных на ЭВМ. Для дискретных объектов, наиболее общим видом описания является разностное уравнение (аналог дифференциального):

 $y_k + a_i y_{k-i} + \dots + a_{na} y_{k-na} = b_1 u_k + b_2 u_{k-i} + \dots + b_{nb} u_{k-nb+i}$, где $y_{k-i} = y[(k-i)T], u_{k-i} = u[(k-i)T]$.

Связь между сигналами может быть отражена:

- через дискретную свертку:

$$y_k = \sum_{i=0}^k w_i u_{k-i},$$

где W_i - ординаты весовой решетчатой функции объекта, или с использованием аппарата Z – преобразования

$$Y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} y_k z^{-k}$$

где $z = e^{PT}$, Р- комплексная переменная; - или через дискретную передаточную функцию

$$W(z) = \frac{Y(z)}{u(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad ,$$

которая определяется на основании разностного уравнения после применения к обеим частям этого уравнения Zпреобразования:

 $(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na})Y(z) = (b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb+1})U(z)$

В данной работе систематически использовалась модель (State space)- для переменных состояния X(t).

Создание моделей на основе наблюдаемых входных и выходных данных при испытаниях образцов на трение решается с помощью системы MATLAB пакетом System Identification Toolbox[6].

1.3.2. Обработка экспериментальных данных с помощью System Identification Toolbox

При обработке и анализе экспериментальных данных удобно использовать графический интерфейс пакета System Identification, который запускается из режима командной строки командой Ident. В результате ее исполнения появляется диалоговое окно, показанное на (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Диалоговое окно графического интерфейса System Identification Toolbox

В режиме командной строки данные из Excel импортируются в MATLAB.

Они загружаются в рабочую среду МАТLAB массивом данных u2 (входные данные) и у2 (выходные данные), относящихся к исследованию трибологиеской пары, при этом u2 – смещение нижнего образца, а у2 – смещение (сила трения) верхнего образца. Загрузка в пакет идентификации осуществляется следующим образом.

В верхнем левом углу окна выбирается в раскрывающемся списке Data (Данные) вариант Import. Это приводит к открытию диалогового окна, показанного на (рис. 1.4).

🥠 Import Data	_ 🗆 ×			
Data Forma	Data Format for Signals			
Vector/Matrix D	Jata 💌			
Workspa	ce Variable			
Input: u				
Output: y				
Data In	formation			
Data name:	mydata			
Starting time:	1			
Samp. interv.:	1			
	More			
Import	Reset			
Close	Help			



Введем в нем имя u2 в поле Input (Вход), y2 — в поле Output (Выход), в поле Samp, inter. (Интервал дискретизации) зададим интервал дискретизации 0.08, в строке Data name (Имя данных) укажем произвольное название, например «Tribal», а в поле Notes (Примечания) — какой-либо поясняющий текст. Затем нажмем кнопку Import. Далее нажатием кнопки Close (Закрыть) закроем окно импорта данных.

Указанные действия приведут к появлению в верхнем левом углу окна интерфейса значка в виде цветной линии, сопровождаемого надписью «Tribal». Это означает, что импортируемые данные введены в среду интерфейса. Сообщения об этих данных также появляются в значках Working Data (Рабочие данные) и Validation Data (Данные для проверки модели).

Проведем исследование исходных данных, для чего установим флажок Time plot (Временной график) в левой нижней части окна интерфейса. Почти сразу появится графическое окно, содержащее графики сигналов u2(t) и y2(t) (рис. 1.5)



Рис. 1.5. Временные диаграммы сигналов u2(t) и y2(t)

В m-файле данного примера входной и выходной сигналы обозначены через u2 и y2. Однако при их отображении в окне графического интерфейса нумерация сигналов автоматически устанавливается с 1, поэтому в строке заголовка окна рисунка фигурируют обозначения ul и yl вместо u2 и y2.

Можно увеличить интересующие нас места графиков, чтобы лучше их рассмотреть, для этого необходимо мышью выделить некоторую прямоугольную область. Выделенный участок сигнала сразу же увеличится в размерах так, что будет занимать все соответствующее окно. Для возвращения к исходному масштабу необходимо дважды щелкнуть мышью на увеличенном графике. А вообще, изменение масштабов графика производится однократным щелчком мыши в области графика: левой кнопкой — для увеличения изображения, правой — для его уменьшения (такое изменение масштабов возможно, только если в меню Style (Стиль) окна Time plot выбран вариант Zoom).

Проведем предварительную обработку сигналов исследуемого объекта, исключив из них постоянную составляющую. С этой целью активизируем раскрывающийся список Preprocess (Предварительная обработка) и выберем в нем вариант Remove means (Удалить среднее). Результатом операции явится появление в одном из значков Data Views (Вид данных) в левой верхней части окна интерфейса информации о новых данных с именем Tribald. Можно опять активизировать окно Time plot и увидеть, что там появилось изображение двух новых сигналов, отличающихся от исходных отсутствием постоянной составляющей. Для их более удобного просмотра целесообразно воспользоваться командой меню окна Options > Autorange (Автоматическое масштабирование). Чтобы просмотру не мешали исходные графики, можно убрать их, просто шелкнув мышью на значке с их представлением (в левой верхней части окна интерфейса), при этом сразу изменится и масштаб изображения.

Приступим теперь к построению модели, принимая в качестве данных для ее построения данные Tribald. Перетянем их мышью в область Working Data (в центре окна интерфейса). Если мы теперь хотим получить какую-то информацию об этих данных или изменить что-либо (например, их имя), щелкнем мышью дважды на соответствующем значке в группе Data Views. Появится диалоговое окно, показанное на (рис. 1.6). Изменим имя данных, например, на Tribal M и закроем данное окно.

💋 Data/model II	nfo: mydata	
Data name: Color:	Tribald [0.25,0.75,0.25	5]
Data set with 500 Sampling interval Outputs Unit (y1 Inputs Unit (if u1) samples. : 1 if specified) [;] specified)	
	Diary And Notes	
% Идентифика Tribal=[[y2],[u2]]; % import Tribal Tribald = dtrend	ция данных (Tribal,0)	•
Present	Close	Help

Рис. 1.6. Окно информации о выбранных данных

Активизируем теперь вариант Select Range (Выбор диапазона) из списка Preprocess. Это приведет к появлению окна, показанного на (рис. 1.7).



Рис.1.7. Окно выбора диапазона

Диапазон можно задать либо в текстовом окошке Time span (Временной диапазон), либо с помощью мыши - выделяя прямоугольную область точно так же, как это проводилось для окна Time plot. Любым из этих способов укажем диапазон и нажмем кнопку Insert (Вставить). Результат проделанной операции отразится появлением значка, символизирующего эти (усеченные) данные (с именем TribalMe) в окне интерфейса.

Повторим операцию задания диапазона с целью формирования данных для проверки модели - например, из оставшейся части начального диапазона, в результате чего появится еще один значок данных с именем TribalMy. Закроем окно выбора диапазона. С помощью мыши перетащим данные TribalMe в область Working Data, а данные TribalMy - в область Validation Data (заметим, что если на каком-то этапе работы с данными допущена ошибка и мы хотим удалить неправильные данные, необходимо просто перетащить их мышью на значок Trash (Мусор) в центральной нижней части окна интерфейса, и они исчезнут). Теперь можно приступать к нахождению оценки модели выбранного вида. Для этого вначале необходимо указать этот вид. Начнем с оценивания переходной функции объекта. В раскрывающемся списке Estimate (Оценивание) выберем вариант Correlation Model корреляционная модель, что приведет к появлению соответствующего диалогового окна.

А в основном окне интерфейса в его правой части (Model Views — Вид моделей) при этом появится значок с надписью crad, означающий, что выбранная модель построена. Чтобы увидеть результат, установим флажок Transient resp (transient response — переходная функция) и увидим в появившемся окне (рис. 1.8) график переходной функции исследуемого объекта, найденной описанным выше корреляционным методом.



Рис.1.8. Оценка переходной функции исследуемого объекта, найденная корреляционным методом

Можно провести детальное изучение данного графика, пользуясь доступными командами меню графического окна или с помощью мыши — так же, как это было проделано ранее при изучении входного и выходного сигналов. Но оценить качество полученной модели можно только в процессе ее сравнения с моделями других видов. Укажем, что, используя команду Options | Impulse response меню данного окна, вместо графика переходной функции можно вывести график ИХ. Оценим модель следующего вида - частотные характеристики объекта. Выберем в списке Estimate вариант Spectral model и повторим только что проделанные операции по нахождению оценки модели. В результате в основном окне интерфейса появится еще один значок с именем spad, символически представляющий модель в виде частотных характеристик найденных спектральным методом. Результат отображается активизацией графического окна Frequency resp (frequency responseчастотные характеристики), показанного на (рис.1.9)



Рис. 1.9. Частотные характеристики, найденные спектральным методом

Перейдем теперь к оцениванию параметрических моделей, выбрав в Estimate вариант Parametric models. Данный выбор приведет к открытию диалогового окна задания структуры модели (рис. 1.10). По умолчанию пользователю предлагается модель типа ARX (см к) с параметрами na = 4, nb = 4, nk = 1. Можно согласиться или не согласится с данными значениями. В последнем случае параметры можно изменить непосредственно в строке окна или с помощью тора порядка модели (Order editor), вызываемого нажатием соответствующей кнопки. Можно вообще выбрать другую параметрическую модель, воспользовавшись раскрывающимся списком в верхней части окна (возможный выбор - модели типа ARX, ARM AX OE BJ, State Space и модель, задаваемая пользователем).

В рассматриваемом примере сохраним значения по умолчанию (ARX, 4, 4, 1) и нажмем кнопку Estimate (Оценить). Результатом действия будет появление значка модели с названием ARX441.

🥠 Parametric Model	5	
Structure:	ABX: [na nb nk]	•
Orders:	441	
Equation:	Ay=Bu+e	
Method:	• ABX • O IV	
Name:	arx441	
Ecous:		
	Prediction	
Initial State:	Auto	<u> </u>
Covariance:	Estimate	•
Order selection	n Order editor	·
Estimate	Close H	elp

Рис. 1.10. Диалоговое окно задания структуры модели

Воспользовавшись далее возможностями редактора порядка модели (Order editor), зададим теперь ARX-модель с параметрами na = 2, nb = 2, nk = 3 (последнее означает наличие в объекте запаздывания с величиной nk·T = =3.0.08 =0.24 c) и повторим операцию оценивания. Это приведет к появлению значка еще одной модели с именем ARXqs (рис.1.11).





Для сравнения полученных моделей активизируем окно Transient resp. (рис. 1.12)



Рис. 1.12. Графики сравнения переходного процесса для трех построенных моделей

Однократный щелчок левой кнопкой мыши на графике модели в ее значке приведет к исчезновению соответствующего графика переходного процесса; повторный щелчок восстанавливает изображение. Двойной щелчок на значке приводит к открытию окна с информацией о модели (рис. 1.13).

🥠 Data/model Info: ir	np	_D×
Model name:	imp	
Color:	[0,0,1]	
Impulse response mod 1 outputs and 1 inputs Estimated from data se	el. et mydatade	▲ ▼
[)iary And Notes	
% Import mydata mydatad = dtrend(myd mydatade = mydatad(imp = impulse(mydata	data,1) [1:250]) de,[-5,40],'P'W',[])	
Present	Close	Help



Вернемся к окну Transient resp. Оставляя в нем только по одному графику (то есть, убирая остальные, как это описано выше), активизируем команду его меню Options > Show 99% confidence intervals (Показать 99%-й доверительный интервал). Просмотрим последовательно переходные процессы с доверительными интервалами для построенных моделей - crad, n4s8 и ARXqs. Сравнение покажет, что первая модель является наименее точной, а вторая и третья дают примерно одинаковые результаты. Какую же модель выбрать в качестве итоговой? При прочих равных условиях, очевидно, более простую, а таковой здесь является (числу оцениваемых коэффициентов) модель ARXqs. Есть и еще один способ сравнения параметрических моделей - путем активизации графического окна Model output (соответствующий флажок расположен в средней нижней части окна интерфейса). Вид окна Model output для выбранных моделей n4s8 и ARXqs приведи на (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Окно сравнения выходов моделей

В левой части данного окна приведены выходы объекта и указанных моделей, а в правой величины, отражающие меру совпадения (среднеквадратичное рассогласование) экспериментальных и прогнозируемых данных. Как видно, несколько точнее оказывается модель ARXqs.

Вообще-то для анализа моделей графический интерфейс пакета System Identification представляет весьма значительные возможности, среди которых отметим только возможность просмотра переходной функции модели с помощью программы LTI Viewer. Хранение построенных моделей производится в два этапа:

•сначала модель вводится в рабочее пространство системы MATLAB (перетаскиванием значка модели в область To Workspace в центре рабочего окна интерфейса), при этом модель будет фигурировать в рабочем пространстве MATLAB под тем же именем, что и в среде интерфейса;

•затем модель сохраняется командой сохранения в режиме командной строки (как любая переменная MATLAB).

Далее можно сохранить все рабочее пространство интерфейса (при его закрытии даже появится соответствующая подсказка) в виде файла с расширением (по умолчанию) sid, при этом в следующем сеансе работы можно загрузить все полученные результаты. Сохраненное рабочее пространство называется сессией.

1.3.3 Оценка качества поверхности

Необходимой частью работы является исследование процесса изменения шероховатости поверхности, а следовательно и качества поверхности подготовленных образцов.

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная на определенной (базовой) длине[4,12].

Она имеет свои характеристики: геометрическую величину неровностей, способность сцепления поверхности с покрытием, отражающую способность, и т.д. Рассмотрим главную характеристику шероховатости – ее геометрическую величину.

Государственный стандарт на шероховатость поверхности устанавливает единый подход к определению величины шероховатости - основой для этого является профиль шероховатости и его параметры (рис. 1.15)



Рис. 1.15. Профилограмма шероховатости поверхности

Линия L, на которой выделяется совокупность поверхностных неровностей, называется базовой линией. Средняя линия профиля (m) – это базовая линия, проведенная таким образом, чтобы площади, ограниченные профилем и средней линией над ней и под ней, были одинаковы. Чем неоднороднее поверхностные неровности и чем они больше, тем больше должна быть базовая длина для того, чтобы выбранная совокупность поверхностных неровностей характеризовала состояние поверхности.

Профилограммы, характеризующие шероховатость поверхности, представляют собой сложную периодическую структуру, из которой можно выделить большое количество всевозможных характеристик для оценки неровностей. Не случайно, что в разных странах мира существуют более 40 геометрических параметров для оценки шероховатости.

Для нормируемых параметров принимается некоторые усредненные значения неровностей. В большинстве стран мира используют шесть параметров характеризующих как высоту поверхностных неровностей, так и линейные (шаговые) показатели этих неровностей.

Вертикальные параметры:

• R_a – среднее арифметическое отклонение профиля;

• R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам;

• R_{max} – наибольшая высота профиля.

<u>Горизонтальные параметры:</u>

S_m – средний шаг неровностей профиля;

S – средний шаг местных выступов профиля;

T_p – относительная опорная длина профиля.

R_a – это среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

где n – число выбранных точек профиля на базовой длине, R_z – это сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_{z} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} |y_{pi}| + \sum_{i=1}^{5} |y_{vi}| \right)$$

где у_{рі} – высота і-го наибольшего профиля выступа, у_{vi} – глубина і-й наибольшей впадины профиля.

R_{max} – это сумма наибольшей высоты выступа и наибольшей глубины впадины.

S_m – это среднее значение отрезков средней линии профиля, содержащего неровности в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_m|$$

Под этим параметром понимается среднее значение длин отрезков средней линии, пересекающих профиль в трех соседних точках и ограниченных двумя крайними точками.

S- это среднее значение отрезков средней линии между проекциями на нее наивысших точек соседних местных выступов профиля в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |S_i|$$

t_p – это отношение сумм длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне р в материале профиля линией, эквидистантой средней линии в пределах базовой длины, к базовой длине:

$$t_p = \frac{100\%}{e} \sum_{i=1}^n b_i$$

Далее приведены данные испытаний для подготовленных образцов пластин (сплав CuAl10Ni) (E=700; р=7,6 г/см³; HB=200(по Бриннелю)) со сформированной шероховатостью поверхности. Исходные профилограммы шероховатости приведены на (рис 1.16-1.18), причем верхняя часть рисунка – это профилограмма верхней контрпары, а нижняя часть – это профилограмма нижней контрпары, из подрисуночных подписей понятно, в какое время и какая пара рисунков представлена. При этом обозначение «0» соответствует начальным замерам.



На (рис 1.17) приведены профилограммы шероховатости после 45 минут эксперимента.

На (рис 1.18) приведены профилограммы шероховатости образцов после 45 минут эксперимента.



Рассмотрим полученные профилограммы. Бросается в глаза появление низкочастотной составляющей на финишных профилограммах. Неровности стали более гладкими, а пики скачков в два раза уменьшились.

1.3.4 Оценка качества поверхности по результатам быстрого преобразования Фурье

На (рис.1.19-1.21) представлены результаты быстрых Фурье преобразований профилограмм (0-45-90).



Рис. 1.19 Результат быстрого Фурье преобразования профилограмм (0 мин)



Видно, что с увеличением времени испытаний высокочастотные составляющие профиля поверхности нивелируются, а низкочастотные начинают доминировать - появляется «несущая» частота. 1.3.5 Результат непрерывного одномерного вейвлет преобразования

Непрерывное одномерное вейвлет преобразование (НВП) лежит в основе применения вейвлетов в технике обработки сигналов[7,15]. Уже само по себе (без реконструкции) оно используется для анализа сигналов и выявления их ло-кальных особенностей.





На (рис.1.22 – 1.24) изображены вейвлетограммы профилограмм.

В нижней части спектрограмм отчетливо видны частые изменения яркости, указывающие на наличие периодических высокочастотных компонентов.

В верхней части заметны менее частые изменения яркости, соответствующие низкочастотным компонентам.

1.3.6 Результат дискретного одномерного вейвлет преобразования

Главным достоинством дискретного одномерного вейвлет преобразования является наличие эффективных алгоритмов быстрого вейвлет – преобразования, которое отчасти напоминает быстрое преобразование Фурье. В частности, для быстрого вейвлет – преобразования (БВП) может эффективно использоваться пирамидальный алгоритм с прореживанием по частоте, используемый и в быстром преобразовании Фурье. Благодаря этому появляется возможность анализа больших выборок за вполне приемлемое для практических целей время. Правда, эти возможности реализуются не для всех типов вейвлетов.







Рис. 1.27 График первого коэффициентов вейвлета Добеши db1 для профилограммы верхнего образца (вверху) и для нижнего образца (внизу). (90 мин)

1.3.7. Анализ с использованием вейвлета Добеши db4

Загрузим профилограмму 311. Профилограф настроен на 512 отсчетов точек. Примем, что частота дискретизации равна 512 отсчетов в секунду. Вейвлет Добеши имеет центральную частоту $F_r = 0.7143$ Гц, и центральная частота вейвлета, используемого для 1-го уровня разложения, равна

Для 2-го уровня разрешения частота вейвлета будет в два раза меньше

F_{r2}=187,86 Гц

Выберем значение масштаба **а** в пределах от 1 до 512 с шагом 4. Это значит, что будут отображены частоты от 365,720 Гц до 0,712Гц. Из рис. 1.28 видно, что спектр частот сигнала хорошо локализован.



Для большей наглядности на рис. 1.29 приведен пространственный график матрицы детализирующих коэффициентов. Из рисунков видно, что структура сигнала на самых больших частотах (а = 1 – горизонталь на рис.1.28 и «частокол» на пространственном графике) фрактальна и для её анализа необходимо использовать методы стохастического анализа.



Рис. 1.29. График вейвлет-коэффициентов сигнала 311

Глава 2 Автоматизация контроля качества поверхности трибопар

2.1 Динамические характеристики системы

Установление корреляции «эволюция динамической системы - эволюция качества трущихся поверхностей» является базой автоматизации контроля качества трущихся поверхностей процесса.

2.1.2 Автокорреляционная и взаимная корреляционная функции.

По записям входного u(t) и выходного y(t) сигналов, полученных при испытаниях образцов, можно оценить автокорреляционную и взаимно корреляционную функции согласно теории случайных процессов.

<u>Автокорреляционная</u> функция случайного процесса характеризует общую зависимость значений процесса в некоторый данный момент времени от значений в другой момент. Пусть мы имеем реализацию y(t), приведенную на рис.2.1



Рис.2.1. Определение автокорреляционной функции

Оценка вида и величины автокорреляции функции, связывающей значения y(t) в момент времени t и t+т, можно получить, вычисляя произведения этих ординат и среднюю величину произведения в пределах времени наблюдения T. Найденное среднее значение произведения приближается к точке значения автокорреляционной функции рассматриваемого сигнала при стремлении Т к бесконечности:

$$R_{y}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} x(t) x(t+\tau) dt$$

Поскольку запись входных и выходных сигналов производится в дискретном виде, то оценку автокорреляционной функции в каждом эксперименте будем определять по N значениям реализации достаточной длинны T:

$$R_{y}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y(t) y(t+\tau)$$

Характеристика $R_{_y}(au)$ - всегда действительная четная

функция с максимумом в точке т =0;

Она может быть как положительной, так и отрицательной

$$egin{aligned} R_{_{y}}(- au) &= R_{_{y}}(au) \ R_{_{y}}(0) &> \mid R_{_{y}}(au) \mid$$
 при любых т.

Взаимная корреляционная функция двух сигналов характеризует общую зависимость значений одного сигнала y(t) от значений другого u(t). Как и в случае автокорреляционной функции, оценку взаимной корреляционной функции можно получить по записям y(t) и u(t) достаточной длины:

$$R_{yn}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y(t+\tau)u(t)$$

Величина $R_{yn}(\tau)$ - всегда действительная функция, которая может быть как положительной, так и отрицательной. Она не обязательно имеет максимум в точке т=0 и не обязательно четной, как это было в случае автокорреляционной функции. Функция $R_{yn}(\tau)$ обладает свойством антиси-

метрии: если у и и поменять местами, то $R_{yn}(\tau) = R_{yn}(-\tau)$

Взаимная корреляционная функция используется, в частности, для определения времени задержки сигнала в исследуемой динамической системе, определения тракта сигнала, обнаружения сигналов в шуме и их восстановление.

2.1.3 Спектральные характеристики

Для исследования частотной структуры процесса трения можно использовать оценки спектральной плотности этого процесса. Спектральная плотность мощности случайного процесса описывает общую структуру процесса через спектральную плотность среднего значения квадрата его значений. Среднее значение квадрата значений реализации в интервале частот w до w+Δw можно получить, подавая эту реализацию на вход полосового фильтра с узкой полосой пропускания и усредняя возведенную в квадрат функцию на выходе фильтра. Это осредненное значение квадрата приближается к точному его значению при стремлении длины записи реализации T к бесконечности.

Важное свойство спектральной плотности заключается в ее связи с автокорреляционной функции. Используя автокорреляционные функции, вычисление по записям входных и выходных сигналов при испытании образцов на трение, можно вычислять оценки спектральных плотностей динамического процесса с использованием вычислительных средств системы MATLAB по формулам:

$$S_{n}(\omega) = \sum_{-\tau=-M}^{M} R_{u}(\tau) g_{M}(\tau) e^{-j\omega\tau}$$
$$S_{y}(\omega) = \sum_{-\tau=-M}^{M} R_{y}(\tau) g_{M}(\tau) e^{-j\omega\tau}$$
$$S_{yn}(\omega) = \sum_{-\tau=-M}^{M} R_{yn}(\tau) g_{M}(\tau) e^{-j\omega\tau}$$

Основным применением спектральной плотности физического процесса является исследование его частотной структуры и для вычисления передаточных характеристик.

2.1.4 Переходные характеристики

Динамические свойства линейных механических объектов и систем автоматического регулирования в целом могут быть описаны уравнениями и графическими характеристиками. В теории автоматического управления применяются два типа таких характеристик- переходные и частотные.

Эти характеристики могут быть сняты экспериментально или построены по уравнению динамического объекта. Может быть и обратная возможность - по экспериментально

полученным характеристикам составить уравнение динамического объекта. Кроме того, с помощью этих характеристик можно определить реакцию объекта исследований на любое возмущение произвольного вида. Таким образом, переходные и частотные характеристики однозначно связаны с уравнением динамического объекта и наряду с ним являются исчерпывающим описанием динамических свойств исследуемого процесса, в нашем случае процесса трения испытуемых образцов.

Переходная функция, или переходная характеристика, h(t) представляет собой график изменения во времени выходной величины динамического объекта, вызванного подачей на его вход скачкообразного воздействия l(t).

1(t)=0 при *t* < 0

1(t)=1 при *t* ≥ 0

2.1.5 Частотные характеристики

Важнейшей характеристикой динамического объекта является его частотная передаточная функция. Частотные характеристики описывают установившиеся колебания на выходе объекта, вызванные гармоническим воздействием на входе

 $u = u_{max}sin(\omega t),$

где u_{max} - амплитуда;

ω - угловая частота воздействия.

Установившиеся колебания на выходе будут иметь вид: $y=y_{max}sin(\omega t+\phi),$

где y_{max} - амплитуда выходных установившихся колебаний; ϕ - фазовый сдвиг между входным и выходным колебаниями.

При фиксированной амплитуде входных колебаний амплитуда и фаза выходных колебаний зависит от частоты. Зависимость от частоты отношения амплитуды $A(\omega) = y_{max}/u_{max}$ называется амплитудной частотной характеристикой (AЧX), а зависимость сдвига фаз от частоты $\phi(\omega)$ - фазовой частотной характеристикой (ФЧX).

Наличие максимума у амплитудной частотной характеристики говорит о резонансных свойствах динамического объекта. Частота, соответствующая максимуму амплитудной характеристики, называется резонансной.

2.2. Сопоставление эволюции динамических характеристик и эволюции качества трущихся поверхностей



Рис.2.2. Последовательность получения и анализа экспериментальных данных

Ниже приведены сопоставленные динамические характеристики, полученные на «Трибале», и данные по шероховатости, полученные на «Калибре». Процесс обработки осуществлялся с помощью пакета MATLAB. В качестве определяющей модели была выбрана модель второго порядка.

Динамические характеристики трибопары:







Верхний образец трибопары:



Профилограмма:

Нижний образец трибопары:

Профилограмма:



Динамические характеристики: Время эксперимента 5 минут:





State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A =			
		x1	x2
	x1	0.7957	0.86259
B =	ΧZ	-0./158/	0.34039
D		u1	
	x1	0.0020641	
~	x2	-0.001001	
C =		v1	v)
	v1	523.8	-26.582
D =	,		
		u1	
	y1	0	
κ =		v1	
	x1	0.0008388	
	x2	-0.00057457	
x(0) =	:		

0

0

Transfer function from input "u1" to output "y1": 1.108 z - 0.8087 ______z^2 - 1.142 z + 0.8931

>> damp(sys)

x1 x2

>> sys=tf(n2s2)

Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s)

5.71e-001 + 7.53e-001i 9.45e-001 6.12e-002 1.15e+001 5.71e-001 - 7.53e-001i 9.45e-001 6.12e-002

Нижний образец:

Профилограмма:



Динамические характеристики:

Время эксперимента 15 минут:



n2s2: -30.9195

State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t) A = x1 x2 0.58454 1.0752 x1 -0.6227 0.58405 x2 B = u1 x1 0.0022498 x2 0.00057548 C = x1 x2 437.19 297.26 y1 D = u1 y1 0 K = y1 x1 0.0010632 x2 8.1841e-006 x(0) =x1 0 x2 0 >> sys=tf(n2s2)

Transfer function from input "u1" to output "y1": 1.155 z - 0.8204 z^2 - 1.169 z + 1.011 >> damp(sys)

Eigenvalue Freq. (rad/s)	Magnitude	e Equiv. Dan	nping	Equiv.
5.84e-001 + 8.18	3e-001i	1.01e+000	-5.71e-	·003
5.84e-001 - 8.18	e-001i 1	L.01e+000	-5.71e-	·003

Верхний образец:

Профилограмма:







Нижний образец:

Профилограмма:



Преобразование Фурье:



Далее с 20 по 25 минуту эксперимента наблюдается эффект накопления энергии. В данном случае он обусловлен появлением дополнительной степени свободы в динамической системе.



Время эксперимента 20 минут:

A = x2 x1 0.62123 0.84878 x1 -0.78574 x2 0.6231 B = u1 0.0011745 x1 x2 -0.00049519 C = x1 x2 620.5 -136.48 y1 D = u1 0 y1 K = y1 x1 0.00084934 x2 -0.00053907 x(0) =x1 0 x2 0 >> sys=tf(n2s2)

Transfer function from input "u1" to output "y1": 0.7964 z - 0.5764 -----z^2 - 1.472 z + 1.017 >> damp(sys)

Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s) 7.36e-001 + 6.89e-001i 1.01e+000 -1.12e-002 9.41e+000

7.36e-001 - 6.89e-001i 1.01e+000 -1.12e-002

Время эксперимента 25 минут:



n2s2: 36.3748

State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A = x2 x1 0.7727 -0.59473 x1 0.8643 0.63759 x2 B = u1 0.0010103 x1 0.0008846 x2 C = x1 x2 538 317.69 y1 D = u1 0 y1 K = y1 x1 0.00056739 x2 0.00099841 x(0) =0 x1 x2 0 >> sys=tf(n2s2) Transfer function from input "u1" to output "y1": 0.8245 z - 0.5693 ----z^2 - 1.41 z + 1.007 >> damp(sys) Equiv. Damping Eigenvalue Magnitude Equiv. Freq. (rad/s) 7.05e-001 + 7.14e-001i 1.00e+000 -4.22e-003 9.89e+000 7.05e-001 - 7.14e-001i 1.00e+000 -4.22e-003

Время эксперимента 30 минут:



n2s2: 52.1039

State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A = x2 x1 0.74018 -0.5841 x1 0.87766 0.62259 x2 В = u1 0.0010927 x1 0.0011369 x2 C = x1 x2 314.03 y1 529.88 D = u1 0 y1 K = y1 x1 0.00047495 x2 0.00087212 x(0) =x1 0 0 x2 >> sys=tf(n2s2) Transfer function from input "u1" to output "y1": 0.936 z - 0.6754 ----z^2 - 1.363 z + 0.9735 >> damp(sys) Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s) 6.81e-001 + 7.14e-001i 9.87e-001 1.66e-002 1.01e+001

6.81e-001 - 7.14e-001i 9.87e-001 1.66e-002

Верхний образец:

Профилограмма:



Преобразование Фурье:



Нижний образец:







Ниже приведены данные полученных результатов:

Сводная таблица показателей, полученная в результате обработки данных моделирования

Время		Частота				
экспе-	Коэфф.	собственных			Ампли-	
римента,	Демпфиро-	колебаний,	Час	тота	туда	
MIИН.	вания, n	ω	БГ	IΦ	БПΦ	
0	0,00194	9,22000	5,870	84,15	76,85	32,05
5	0,06120	11,50000	1,950	41,00	76,85	249,65
15	-0,00571	11,9	5,870	82,20	100,1	33,55
30	0,01660	10,1	5,850	62,20	15,6	2,8







Представленные здесь окна рисунка 2.3 получены из данных по анализу динамических характеристик(два горизонтальных верхних) и профилограмм (четыре нижних рисунка).

2.3. Выверенные динамические характеристики трибопары

Результаты анализа предыдущего раздела убедительно показывают, что динамические характеристики трибопары эволюционируют в определенном соответствии с эволюцией качества трущихся поверхностей. Для более убедительной оценки этой корреляции безусловно следует поработать с моделями 4-го порядка, которая реализует динамику системы с двумя степенями свободы, и с моделями 6-го порядка, реализующей динамику системы с тремя степенями свободы, которая учитывает наличие третьего тела. Однако бывает достаточно использовать для этой цели и выверенную модель 2-го порядка.

Время эксперимента 0 минут:





n2s2: 63.2883

State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A =			
		x1	x2
	x1	0.52827	-0.92986
	x2	0.4421	-0.11683

В =

	u1	
x1	0.0033945	
x2	0.0025856	

C =	y1	x1 383.88	x2 -7.2656
D =	у1	u1 0	
К =			

y1

>> sys=tf(n2s2)

Transfer function from input "u1" to output "y1": 1.284 z - 0.7717

z^2 - 0.4114 z + 0.3494

Transfer function from input "v@y1" to output "y1": $50.85 \text{ z}^2 - 8.622 \text{ z} + 16.07$

z^2 - 0.4114 z + 0.3494

Sampling time: 0.08 >> damp(sys)

Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s)

2.06e-001 + 5.54e-001i 5.91e-001 3.97e-001 1.66e+001

2.06e-001 - 5.54e-001i 5.91e-001 3.97e-001 1.66e+001







n2s2: 72.5684

State-space model: x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A =

	x1	x2
x1	0.72106	0.74112
x2	-0.61871	0.31502

В =

	u1
x1	0.0022602
x2	-0.0010427

C =

	x1	x2
y1	455.83	-5.7068

 $D = u1 \\ y1 & 0 \\ K = y1 \\ x1 & 0.00083448 \\ x2 & -0.0001887 \\ x(0) = x1 & 0 \\ x2 & 0 \\ x2 & 0 \\ x2 & 0 \\ x1 & 0 \\ x2 & 0 \\ x2 & 0 \\ x1 & 0 \\ x2 & 0 \\ x2 & 0 \\ x1 & 0 \\ x2 & 0 \\ x2 & 0 \\ x3 & 0 \\ x4 & 0 \\ x4 & 0 \\ x5 & 0 \\ x5$

>> sys=tf(n2s2)

Transfer function from input "u1" to output "y1":

1.036 z - 0.6731

z^2 - 1.036 z + 0.6857

Transfer function from input "v@y1" to output "y1":

41.74 z^2 - 27.32 z + 21.05

z^2 - 1.036 z + 0.6857

I/O groups:

Group name I/O Channel(s) Measured I 1 Noise I 2

Sampling time: 0.08

>> damp(sys)

Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s)

5.18e-001 + 6.46e-001i 8.28e-001 2.06e-001 1.14e+001

5.18e-001 - 6.46e-001i 8.28e-001 2.06e-001

Время эксперимента 10 минут:



-300

5 10

15 20 25 30 Time

35 40 45 50

n2s2: 74.8946

State-space model: $x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)$ y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)			>> sys=tf(n2s2)
			Transfer function from input "u1" to output "y1":
A =	x1	x2	0.9486 z - 0.6402
x1 x2	x1 0.7377 x2 -0.61789	0.62026 0.4031	z^2 - 1.141 z + 0.6806
В =			Transfer function from input "v@y1" to output "y1":
x1 0.00 x2 -0.00	ul x1 0.0018267		42.11 z^2 - 30.04 z + 16.31
	XZ -0.0010204		z^2 - 1.141 z + 0.6806
C =			I/O groups:
C –	x1 y1 483.51	x2 -63.698	Group name I/O Channel(s) Measured I 1 Noise I 2
D =	u1		
	y1 0		Sampling time: 0.08
K =			>> damp(sys)
	y1 x1 0.00082124 x2 -0.00047758		Eigenvalue Magnitude Equiv. Damping Equiv. Freq. (rad/s)
x(0) =			5.70e-001 + 5.96e-001i 8.25e-001 2.32e-001 1.04e+001
	x1 0 x2 0		5.70e-001 - 5.96e-001i 8.25e-001 2.32e-001
Время эксперимента 15 минут:



C =	x1 0.0 x2 -0.0	u1 0015884 0031715				
C	y1 4	×1 490.94	x2 -7.0)321		
D =						
К =	y1	u1 0				
	x1 0.0 x2 2.78	y1 0093025 329e-005				
x(0) =						
	x1 x2	0 0				
>> sy:	s=tf(n2s2	2)				
Transf 0.78	er functio 2 z - 0.4	n from in 888	put "	u1" to ou	itput "y1"	':
z^2 -	1.257 z +	- 0.7647				
Transf 40.8 z	er functio ^2 - 32.6	on from in 55 z + 22.	put " 41	v@y1" to	output "	y1":
z^2 ·	- 1.257 z	+ 0.7647				
Sampl	ing time:	0.08				
>> da	mp(sys)					
Eigenv	alue	Magnitu	de	Equiv. D	amping	Equiv
6.28e-	001 + 6.	08e-001i	8.	74e-001	1.72	e-001
9.76e+00 6.28e-	·001 - 6.0)8e-001i	8.7	74e-001	1.72e	-001

Equiv.

Глава З Стохастический анализ шероховатости поверхности

Микрогеометрия поверхностей представляет собой геометрический объект, который относится к классу фракталов[17,18,20]. Поэтому в основе оценок шероховатости в данной главе лежат подходы к вычислению стохастических характеристик фрактальных геометрических объектов, которые интерпретируются как сигналы в нелинейных диссипативных динамических системах. Поэтому вся терминология заимствована из теории динамического хаоса. До начала 60-х годов в нелинейных диссипативных динамических системах в стационарном режиме наблюдали только периодические и квазипериодические движения. Однако в 1963 году в динамической системе Лоренцем [20] было обнаружено очень сложное движение, которое воспринималось как хаотическое. Для характеристики таких движений ввели понятие "динамический хаос". Слово "динамический" означает, что отсутствуют источники флуктуаций. В статье математиков Рюэля и Такенса [20], опубликованной в 1971 году, был введен новый математический образ динамического хаоса - странный аттрактор. Слово "странный" подчеркивает два свойства аттрактора. Это, во-первых, необычность его геометрической структуры. Размерность странного аттрактора является дробной (фрактальной). Вовторых, странный аттрактор - это притягивающая область для траекторий из окрестных областей. При этом все траектории внутри странного аттрактора динамически неустойчивы, что выражается в сильной (экспоненциальной) расходимости близких в начальный момент траекторий.

3.1. Методы вычисления стохастических характеристик

3.1.1. Требования к исходным данным

Для вычисления таких статистических средних, как размерность, энтропия, спектр показателей Ляпунова, и других характеристик аттрактора, необходимо иметь множество точек, определенных в фазовом пространстве размерности n и принадлежащих аттрактору. Число точек *M* в расчетах конечно, но обязано быть достаточно большим. Согласно формуле, предложенной в [20]

$$M \ge M_{\min} = 10^{2+0.4D}$$
, (3.1)

где *D* - размерность аттрактора. В случае, когда динамическая система задана дискретным оператором отображения, точки находятся автоматически после задания начальных условий. Если динамическая система задана системой дифференциальных уравнений, то в общем случае решение может быть найдено только численным интегрированием системы на компьютере. Однако часто требуется вычислить характеристики аттрактора некоторой реальной системы, математическая модель которой неизвестна. При этом, как правило, неизвестна и размерность ее фазового пространства. В этой ситуации мы располагаем информацией о поведении во времени какой-либо одной из динамических переменных. К тому же и интервал времени экспериментальной реализации естественно ограничен. Можно ли в таких условиях получить характеристики аттрактора? Путь к решению этой проблемы был предложен Такенсом. В [20] доказано, что почти для всех гладких динамических систем по имеюшейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной можно сконструировать новый аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у исходного.

3.1.2. Восстановление аттрактора по временному (пространственному) ряду

Пусть имеется временной ряд экспериментальных данных, представляющий собой отсчеты некоторой физической величины: $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$. Если известен шаг по времени Δt , то время $t = k \cdot \Delta t$. Предполагается, что физическая величина *s* является одной из переменных динамической системы. Система находится в стационарном режиме, т.е. фазовая траектория проходит внутри аттрактора. Для восстановления аттрактора Такенсом предложен метод временной задержки координат. В *n*-мерном фазовом пространстве строится последовательность точек вида:

$$x_{k} = (s_{k}, s_{k+\tau}, \mathbf{K}, s_{k+(n-1)\tau}),$$

$$k = \overline{0, m-1}, \quad m = M - (n-1)\tau.$$
(3.2)

Здесь *т* – временная задержка, *n* – размерность вложения.

Основной результат Такенса состоит в следующем. Если $M \to \infty$, то множество точек $x_k \in R^n$ задает вложение исходного аттрактора почти при любом выборе наблюдаемой переменной, если n не меньше удвоенной размерности исходного аттрактора. Для оценки характеристик реального исследуемого аттрактора можно вычислять характеристики восстановленного аттрактора. С целью уменьшения ошибки, обусловленной конечностью набора экспериментальных точек $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$, необходимо проводить расчеты при нескольких различных значениях M и n, и добиваться независимости получаемых оценок характеристик от M и n в пределах заданной точности.

3.1.3. Выбор временной задержки (сдвига) τ

Для малых шагов по времени Δt значения s_k и s_{k+1} будут близкими, поэтому большое значение приобретает правильный выбор временной задержки τ . Необходимо стремиться выбрать τ так, чтобы корреляция между s_k и $s_{k+\tau}$ была по возможности минимальной. Традиционный способ выбора временной задержки состоит в вычислении автокорреляционной функции временного ряда:

$$B(\tau) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} (s_k - \bar{s}) (s_{k+\tau} - \bar{s}), \quad m = M - \tau.$$
 (3.3)

Задержка τ выбирается равной времени первого пересечения нуля автокорреляционной функции. Второй способ требует вычисления спектра мощности временного ряда, т.е. быстрого преобразования Фурье автокорреляционной функции. Если в спектре мощности присутствуют кратные пики, то задержка τ выбирается равной четверти периода самой высокой из доминирующих частот. Третий способ [20] основан на вычислении средней взаимной информации между двумя измерениями. Пусть даны два множества измерений *A* и *B*. Взаимная информация между элементом *a_i* множества *A* и элементом *b_j* множества *B* определяется как количество информации, которое имеют измерения *a_i* и *b_j* по отношению к друг другу:

$$I_{a_{i},b_{j}} = \ln \left[\frac{P_{AB}(a_{i},b_{j})}{P_{A}(a_{i})P_{B}(b_{j})} \right].$$
 (3.4)

Если измерения независимы, то взаимная информация равна нулю. Усредняя по всем измерениям, получаем:

$$I_{AB} = \sum_{a_i, b_j} P_{AB}(a_i, b_j) \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i) P_B(b_j)} \right].$$
 (3.5)

Заменяя a_i и b_j на s_k и $s_{k+\tau}$ соответственно, получаем среднюю взаимную информацию как функцию временной задержки τ . Задержка τ выбирается равной времени первого минимума во взаимной информации.

3.1.4. Алгоритм вычисления корреляционной размерности аттрактора

В случае модельных данных, когда нам известна размерность n фазового пространства динамической системы и все n координат каждой точки на аттракторе, корреляционную размерность D_2 аттрактора находят следующим образом [20]. Рассмотрим корреляционный интеграл C(r), показывающий относительное число пар точек аттрактора, находящихся на расстоянии, не большем r:

$$C(r) = \frac{1}{m(m-1)/2} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=j+1}^{m-1} \theta(r - \rho(x_i, x_j)), \qquad (3.6)$$

здесь θ – функция Хевисайда: $\theta(\alpha) = \begin{cases} 1, \ \alpha \ge 0, \\ 0, \ \alpha \le 0, \end{cases}; \ \rho$ – рас-

стояние в *n*-мерном фазовом пространстве, m - число точек x_i

на аттракторе.

Если выполняется условие

$$C(r) \sim r^{D_2}, \qquad (3.7)$$

то D_2 считают корреляционной размерностью аттрактора. Справедливость приведенного степенного закона ограничена значениями r, достаточно малыми по сравнению с размером аттрактора. При увеличении r величина C(r) достигает насыщения $C(r) \rightarrow 1$ (при r, сравнимых с размером аттрактора). С другой стороны, при очень малых значениях r число пар точек (\mathbf{x}_i , \mathbf{x}_j), расстояние между которыми не превышает r, становится малым (из-за конечности числа точек на аттракторе) и статистика становится бедной. Кроме того, приобретает решающее значение влияние инструментальных ошибок измерения сигнала. Следовательно, на практике степенной закон выполняется только в ограниченном диапазоне значений r (скейлинговом диапазоне), который и может быть использован для определения размерности аттрактора.

Учитывая, что из (3.7) следует

$$\ln C(r) \sim D_2 \ln r , \qquad (3.8)$$

получаем оценку размерности аттрактора как тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей график корреляционного интеграла C(r) в двойном логарифмическом масштабе. В случае экспериментальных данных мы обычно не знаем размерность фазового пространства системы и располагаем информацией только об одной координате точек на аттракторе. Поэтому все расчеты проводятся для нескольких размерностей фазового пространства n = 1, 2, 3,... Для восстановления аттрактора используется метод Такенса. При этом корреляционная размерность аттрактора $D_2(n)$ сначала возрастает, но затем обычно выходит на постоянный уровень $D_2(n) \approx D_2$. Таким образом, получают искомую корреляционную размерность D₂ аттрактора и оценку размерности фазового пространства системы $n \le 2D_2 + 1$. Если же выходной сигнал динамической системы сильно зашумлен, то размерность аттрактора постоянно растет.

3.1.5. Алгоритм вычисления корреляционной энтропии аттрактора

Корреляционная энтропия K_2 может быть вычислена достаточно просто [27]. Для этого также вычисляют корреляционный интеграл (3.6), но рассматривают не только его зависимость от расстояния r, но и от размерности фазового пространства n. При этом полагают, что

$$C(r,n) \sim r^{D_2} \exp(-nK_2),$$
 (3.9)

откуда

$$K_2(r,n) = \ln \frac{C(r,n)}{C(r,n+1)}.$$
 (3.10)

Энтропия *K*₂ аппроксимируется в приемлемом диапазоне значений *r* и *n*.

3.1.6. Построение динамической модели по экспериментальным данным

В самом общем случае не известно никакой определенной модели. По одной наблюдаемой динамической переменной необходимо восстановить систему дифференциальных уравнений (СДУ) или дискретное отображение, которые управляют поведением данного временного ряда [1]. Обычно модель задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений dx/dt = F(x), где x - точка в nмерном фазовом пространстве. Затем F(x) строится с помощью полиномов от фазовых переменных [15]. В этот способ могут быть добавлены различные усовершенствования, включающие использование разложения временного ряда по некоторой системе базисных функций для облегчения эффективного выбора полиномов для СДУ и фильтрации шума в данных [7]. Можно определять параметры динамической системы по экспериментальному временному ряду и предложенному виду СДУ. Стохастические характеристики "подогнанного" аттрактора могут быть затем сравнены с характеристиками "сырого" аттрактора с целью убедиться в адекватности предложенной модели. В простейшем случае модельные параметры входят линейно в СДУ. Типичные примеры - системы Лоренца [20] и Ресслера [20]. В более сложных ситуациях, таких как физический маятник, некоторые модельные параметры входят линейно, в то время как остальные - нелинейно. Применение метода наименьших квадратов для поиска параметров дает хорошие результаты в обоих случаях. Допускается даже присутствие умеренного количества ($\leq 1\%$) аддитивного шума.

3.2. Обработка экспериментальных данных с помощью программы Fractan

Вышеприведенные характеристики можно вычислить с помощью программы, разработанной В.В. Сычевым.

Первый раз программа запускается с английским интерфейсом. Перейти на русский можно из меню «Options» => «Russian Interface». При открытии временного ряда отсчеты трактуются как вещественные, независимо от того, целые они или вещественные на самом деле. При последующей «загрузке» отсчеты преобразуются в целочисленные. Здесь есть два варианта в зависимости от состояния пункта меню «Параметры» => «Целочисленные исходные данные». Если там стоит галочка, либо был открыт звуковой файл, то отсчеты просто округляются до ближайшего целого. Если нет, либо, если диапазон отсчетов окажется больше 65535, то отсчеты сначала подвергаются линейному преобразованию с тем, чтобы их диапазон после округления стал стандартным: от -32768 до 32767. Открыть временной ряд можно с помощью меню «Файл» => «Открыть» или кнопки «Обработка», но перед началом расчета корреляционного интеграла или показателя Херста из этого временного ряда нужно еще загрузить отсчеты для обработки с помощью пункта меню «Обработка» => «Загрузить отсчеты» или кнопки «Обработка». При этом загружаются отсчеты от «Первый отсчет» до «Последний отсчет», поэтому эти два параметра необходимо выставить до загрузки отсчетов. Либо вручную, либо меняя масштаб рисунка мышкой. Левой кнопкой мыши можно выделять прямоугольник на рисунке и автоматически он показывается на всем окне. Т.е. доступен выбор масштаба. Правой кнопкой мыши можно выполнять прокрутку рисунка по горизонтали и вертикали. Для этого нажимаем правую кнопку, перемещаем мышь и отпускаем кнопку. Вернуться к исходному масштабу можно двойным кликом по рисунку. Кстати, выбор масштаба доступен всегда, что бы ни было нарисовано: отсчеты, автокорреляционная функция, средняя взаимная информация, траектория в фазовом пространстве, корреляционная размерность, корреляционная энтропия или зависимость нормированного размаха для расчета показателя Херста. Во время загрузки отсчетов вычисляются автокорреляционная функция и средняя взаимная информация для первой колонки в файле данных.

Предлагаемая автоматически оптимальная временная задержка может соответствовать времени:

* первого локального минимума средней взаимной информации;

* первого пересечения нуля автокорреляционной функции;

* первого локального минимума автокорреляционной функции.

Все зависит от того, что окажется меньше. Траектории в двумерном фазовом пространстве для одномерных временных рядов рисуются с учетом временной задержки «Оптим. задержка». Тоже самое применяется и для траекторий в трехмерном фазовом пространстве для одномерных и двумерных временных рядов. Если же количество колонок в исходном файле данных позволяет, то для отображения траекторий в 2D или 3D фазовом пространстве используются, соответственно, первые 2 или первые 3 колонки.

Начать расчет корреляционного интеграла можно из пункта меню «Обработка» => «Корреляционный интеграл» или нажатием кнопки «Обработка». В случае одномерного ряда данных при этом используется выставленная временная задержка «Оптим. задержка» и максимальная размерность фазового пространства «Макс. размерность». Если «Макс. размерность» не выставлена, либо меньше 2 или больше 37, то она будет найдена автоматически в процессе расчета. В любом случае размерность фазового пространства будет расти от 1 до «Макс. размерность». Однако если нажать кнопку «Стоп», то программа досчитает при текущей размерности фазового пространства и остановится. По корреляционному интегралу находятся корреляционная размерность и корреляционная энтропия. Результаты записываются в два текстовых файла *.dim и *.ent, которые затем могут быть открыты из меню «Файл» => «Открыть», нарисованы и сохранены как черно-белый рисунок *.bmp

(меню «Файл» => «Сохранить рисунок»). В случае многомерного ряда данных корреляционная энтропия не рассчитывается. Корреляционная размерность и энтропия рисуются из пунктов меню «Просмотр» => «Корреляционная размерность» и «Просмотр» => «Корреляционная энтропия». При этом учитывается параметр «Макс. размерность». Размерность фазового пространства не будет превышать значение этого параметра. Минимальная длина временного ряда данных для обработки равна 512. Рекомендуемая длина не меньше 10^(2+0.4*D), где D - корреляционная размерность аттрактора. Однако если длина временного ряда будет больше 32768, то перед началом вычисления корреляционного интеграла выдается предупреждение, поскольку сложность расчета растет как квадрат количества отсчетов и время расчета может затянуться. Если предупреждение будет проигнорировано, то расчеты начнутся, причем использоваться будут все загруженные отсчеты, а не только первые 32768!

Минимальная размерность фазового пространства - 1.

Максимальная размерность фазового пространства - от 2 до 37.

Минимальная временная задержка - 1.

Максимальная временная задержка - не более 256.

Вычислить показатель Херста можно с помощью пункта меню «Обработка» => «Показатель Херста». После расчета на экране рисуется временная зависимость нормированного размаха в двойном логарифмическом масштабе и ее линейная аппроксимация. Наклон аппроксимирующей прямой и есть оценка показателя Херста.В файл показателя Херста пишутся только результаты аппроксимации, а сама временная зависимость нормированного размаха не сохраняется и ее можно нарисовать из пункта меню «Просмотр» => «Показатель Херста» только после соответствующего расчета. Однако после того как она нарисована, ее можно сохранить через меню «Файл» => «Сохранить».

3.2.1. Стохастический анализ профилограммы 411

FRACTAN 4.4 Correlation Dimension

Data = C:\Documents and Settings\Viktor\Мои документы\tribal\411.DAT

Left :	= 0				
Right	= 511				
Lag	= 5				
MaxDi	m = 5				
Range	= 12.0	000080			
LDist	-4.7	-4.7 -	4.3 -3	3.3 -3.	3
RDist	-1.3	-2.7 -	2.3 -1	L.3 -1	.3
Sigma	0.115	0.300	0.562	0.402	0.505
CorrDi	m 0.900	0 1.437	7 1.749	9 1.302	7 1.400
PhSpD	im 1	2	3 4	5	
-12.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-12.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-12.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-11.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-11.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-11.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-10.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-10.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-9.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-9.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-8.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-8.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-/./	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-7.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-7.0	2.000	3.000	4.000	0.000	0.000
-0.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.0	2.000	0.000	4.000	0.000	0.000
-3.7	1 472		4 000	0.000 5.000	6.000
-5.0	1.475	2.097	3 0 8 5	3.000	0.000 1 157
-4.7	0.888	1 707	2 627	3 5 3 0	4 566
-43	0.000	1 340	2.027	2.550 2.714	3 368
-4 0	1 1 5 9	1 969	2.005	3 629	2.300 4.431
-3.7	0.872	1 364	1 859	2 361	2 884
-33	1 017	1 430	1 803	2 1 2 8	2 4 5 4
-3.0	0.998	1.306	1.520	1.688	1.837
-2.7	0.772	0.946	1.071	1.145	1.203

	-2.3 -2.0 -1.7 -1.3 -1.0 -0.7 -0.3 0.0	0.895 0.843 0.898 0.831 0.642 0.551 0.328 0.092	1.014 0.931 0.946 0.957 0.711 0.590 0.366 0.108	1.096 0.977 0.979 0.999 0.755 0.607 0.380 0.109	1.161 1.014 0.999 1.016 0.782 0.619 0.382 0.104	1.212 1.047 1.020 1.027 0.801 0.625 0.382 0.098	
ть	FRACT Data I\tribal [\] Left Right	AN 4.4 = C:\[\411.DA = 0 = 511	Correlat Documer T	ion Entr	opy Setting	s\Viktor\Мои докумен	-
	Lag MaxDi Range LDist RDist Sigma	= 5 m = 5 = 12.0 -12.3 -9.3 0.000 0t 6 708)80000 -12.3 -7.7 - 0.000 7 911	-7.0 - 5.0 -4 0.227 4 959	6.0 4.0 0.344 3.610		
	PhSpD -12.7 -12.3 -12.0 -11.7	0im 1 6.708 6.708 6.708 6.708 6.708	2 7.911 7.911 7.911 7.911	3 4 0.000 0.000 0.000 0.000	0.000 0.000 0.000 0.000		
	-11.3 -11.0 -10.7 -10.3 -10.0	6.708 6.708 6.708 6.708 6.708	7.911 7.911 7.911 7.911 7.911	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000		
	-9.7 -9.3 -9.0 -8.7	6.708 6.708 6.708 6.708	7.911 7.911 7.911 7.911 7.911	0.000 0.000 0.000 0.000	0.000 0.000 0.000 0.000		
	-8.3 -8.0 -7.7 -7.3 -7.0	6.708 6.708 6.708 6.708 4.611	7.911 7.911 7.911 7.911 5.388	0.000 0.000 0.000 0.000 6.134	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000		
	-6.7	4.611	5.388	6.134	0.000		

-6.3	4.611	5.388	6.134	0.000
-6.0	3.644	4.195	4.696	5.210
-5.7	3.644	4.195	4.696	5.210
-5.3	3.019	3.477	3.704	4.160
-5.0	2.568	2.935	3.212	3.610
-4.7	2.203	2.453	2.642	2.902
-4.3	1.926	2.074	2.216	2.407
-4.0	1.537	1.587	1.659	1.768
-3.7	1.283	1.282	1.301	1.352
-3.3	1.042	1.012	1.008	1.026
-3.0	0.837	0.807	0.797	0.803
-2.7	0.700	0.668	0.662	0.667
-2.3	0.569	0.537	0.528	0.531
-2.0	0.454	0.427	0.416	0.416
-1.7	0.346	0.319	0.309	0.307
-1.3	0.219	0.207	0.201	0.200
-1.0	0.130	0.120	0.115	0.113
-0.7	0.060	0.054	0.049	0.048
-0.3	0.015	0.012	0.010	0.009
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000

Значения корреляционной размерности CorrDim при различных размерностях фазового пространства PhSpDim зафайле писаны в этом в колонках таблицы. В строках ниже PhSpDim слева записано значение двоичного логарифма расстояния в фазовом пространстве относительно общего размера аттрактора, а правее - соответствующие значения корреляционной размерности. В строке CorrDim записаны значения корреляционной размерности, которые программа автоматически получает по соответсвующей колонке, но не всегда это дает хороший результат. В столбце находится участок, на котором значения размерности более менее одинаковы и затем значения корреляционной размерности из этого участка усредняются.

Далее теоретически нужно смотреть получившуюся строку значений слева направо, пока значения размерности не перестанут расти. Вот этот-то предел и есть искомое значение корреляционной размерности. Если предела не существует, то исходные данные представляли собой не динамический ряд, а просто шум. Смысл остальных записей в этом файле следующий: Data = Имя исходного файла данных

Left = Номер первого отсчета

Right = Номер последнего отсчета

Lag = Временная задержка (в отсчетах)

MaxDim = Максимальная размерность фазового пространства

Range = Диапазон значений отсчетов в исходном файле данных

LDist - Левая граница наилучшего интервала расстояний

RDist - Правая граница наилучшего интервала расстояний

Sigma - Погрешность вычисления корреляционной размерности

Содержание файла корреляционной энтропии аналогично. Только в строке Sigma выводится погрешность вычисления энтропии, деленная на значение энтропии. Файл показателя Херста содержит совсем немного информации:

FRACTAN 4.4 Hurst Exponent

Data = C:\Sychyov\Examples\OneDim\Lorenz.dat Left = 0 Right = 512 Hurst = 0.5385 HDelta = 0.0446

Здесь Hurst - собственно показатель Херста, HDelta - погрешность его вычисления,

Фрактальная размерность D = 2 - H = 1,4615 с погрешностью 0,0446.

3.3. Пример последовательного вейвлет-фрактального анализа профилограммы

3.3.1. Многоуровневый вейвлет-анализ профило-граммы

Рассмотрим одну из реальных профилограмм (обозначим ее как <u>сигнал 111</u>), которая представлена на рис. 3.1. Как и в случае, рассмотренном в разделе 1.3.7, частота дискретизации равна 512 отсчетов в секунду.



Для вейвлет-разложения применим вейвлет Добеши db4, имеющий носитель на промежутке [0, 7]. С помощью ППП Matlab проведем разложение сигнала 111 до уровня №3 (рис. 3.2).



Первый, второй и третий уровни разложения – это детализирующие вейвлет-коэффициенты cD1, cD2, cD3, отражающие характеристики сигнала на соответствующих частотах: 365 Гц, 182.5 Гц; 91.25 Гц. С точки зрения физики процесса больший интерес представляют компоненты сигнала, которые соответствуют прямому восстановлению отдельно по каждому набору детализирующих коэффициентов – это компоненты сигнала ScD1, ScD2, ScD3 на указанных частотах. Результаты восстановления представлены на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Восстановленный сигнал 111 по частотам

На рис. 3.4 представлен энергетический спектр компонентов ScD1, ScD2, ScD3, на рис. 3.5 – вейвлетограмма, на рис. 3.6 – матрица вейвлет-коэффициентов.



Рис. 3.4. Энергетический спектр компонентов ScD1, ScD2, ScD3



Рис. 3.6. График матрицы коэффициентов вейвлет-разложения

Из анализа результатов, представленных на рис. 3.3 – 3.6, следует, что самая высокочастотная компонента сосредоточила в себе основные особенности сигнала, связанные с особенностями его как динамической системы (его внутреннюю динамику). В низкочастотных компонентах проявляются признаки периодических составляющих сигнала.

3.3.2. Фрактальный анализ (внутренняя динамика сигнала)

Как видно на рис. 3.3 и рис. 3.4, поведение компонент сигналов имеет характер хаотичности. Мы отмечали, что по имеющимся одномерным данным можно построить динамическую систему в многомерном фазовом пространстве, для которой наблюдаемая переменная будет одной из координат. Метод построения был предложен Такенсом в 1981 г. Для оценки хаотичности сигнала (и, соответственно, особенности профилограммы) в настоящее время успешно используются такие характеристики как фрактальная размерность, показатель Херста, корреляционная размерность и размерность фазового пространства. Размерность фазового пространства есть минимальная размерность пространства, в которое можно вложить ряд значений сигнала в виде динамической системы - странного аттрактора. Наша задача состоит в том, чтобы идентифицировать эту сушественно нелинейную динамическую систему. Здесь уровень идентификации отличается от уровня идентификации линейных систем, как это было использовано в разделе «внешняя динамика». Для анализа были выбраны:

- А) Сигнал 111;
- В) Компонента ScD1;
- С) Компонента ScD2.

Приведем некоторые результаты расчета:

FRACTAN 4.4 Hurst Exponent

Data	=	D:\mydoc\tribal\(K1)a111plus.txt
Left	=	0
Right	=	511
Hurst	=	0.213273
HDelta	=	0.110530
HAlpha	1	= 4.237848
FRACT	AN	4.4 Hurst Exponent
Data	=	D:\mydoc\tribal\K1(ScD1).txt
Left	=	0
Right	=	523
Hurst	=	0.091166
HDelta	=	0.069670
HAlpha	1	= 2.185308

FRACTAN 4.4 Hurst Exponent Data = D:\mydoc\tribal\K1(ScD2).txt Left = 0 Right = 549 Hurst = 0.048417 HDelta = 0.065326 HAlpha = 5.092101 В таблице представлены сводные данные.

Данные	Максимальная размерность ФП MaxDim	Показатель Херста Н	Фрактальная размерность D ₂
А	9	0.213	1.787
В	3	0.091	1.909
С	3	0.048	1.952

Эти расчеты показывают, что в максимальную размерность фазового пространства (MaxDim = 3) можно вложить ряд значений сигнала в виде динамической системы «Странный аттрактор Лоренца».

3.3.3. Управляющий параметр аттрактора Лоренца

Аттрактор Лоренца был предметом исследования многих ученых. При этом в качестве управляющего параметра выбирался параметр *r*:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = -\sigma x + \sigma y, \\ \mathbf{y} = rx - y - xz, \\ \mathbf{x} = -bz + xy. \end{cases}$$
(3.1)

Введем ряд обозначений с учетом опыта использования физических параметров линейных систем:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = -\sigma_{1}x + r_{1}^{2}y, \\ \mathbf{y} = r_{2}^{2}x - \sigma_{2}y - xz, \\ \mathbf{x} = -\sigma_{3}z + xy. \end{cases}$$
(3.2)

Примем $r_1 = r_2 = r > 0$ – частотные параметры; $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma > 0$, $\sigma_3 = b > 0$ – параметры демпфирования. По аналогии с линейными системами введем управляющий параметр:

$$\lambda = 2r^2 - (2\sigma + b)^2.$$
 (3.3)

Каждая из групп параметров – $2r^2$ и $(2\sigma+b)^2$ – меняются по конкурирующему сценарию так, чтобы была обеспечена самоорганизация процесса. В частности, эти изменения для обоих слагаемых могут быть сигмоидного типа (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Сигмоидные кривые конкурирующих параметров

Эти соображения выходят за рамки данной монографии и поэтому мы только их отметим. Рассмотрим некоторые предельные случаи значений управляющего параметра (УП).

УП1:
$$2\sigma + b = 0 \Rightarrow 2\sigma = -b;$$

 $\lambda = 2r^2 > 0$

Система (3.2) перепишется в виде

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \frac{b}{2}x + r^{2}y, \\ \mathbf{y} = r^{2}x + \frac{b}{2}y - xz, \\ \mathbf{x} = -bz + xy. \end{cases}$$
(3.4)

Имеет смысл рассматривать только случаи положительных значений коэффициентов демпфирования и, значит, вместо (3.4) запишем

$$\begin{cases} \mathbf{x} = r^2 y, \\ \mathbf{y} = r^2 x - xz, \\ \mathbf{x} = xy, \end{cases}$$
(3.5)

что дает в линейном приближении на плоскости хОу интегральных кривых гиперболу

$$\frac{x^2}{c^2} - \frac{y^2}{c^2} = 1.$$

$$\lambda = 0, \qquad \Rightarrow 2r^2 = (2\sigma + b)^2;$$

$$[r\sqrt{2} - (2\sigma + b)][r\sqrt{2} + (2\sigma + b)] = 0.$$

УП2-1:
$$r\sqrt{2} = 2\sigma + b;$$

 $b = r\sqrt{2} - 2\sigma.$

Система (3.2) перепишется в виде

$$\begin{cases} \mathbf{x} = -\sigma x + r^{2} y, \\ \mathbf{y} = r^{2} x - \sigma y - xz, \\ \mathbf{x} = -(r\sqrt{2} - 2\sigma)z + xy. \end{cases}$$
(3.6)

УП2-2:
$$r\sqrt{2} = -2\sigma - b;$$

 $b = -r\sqrt{2} - 2\sigma.$

Система (3.2) перепишется в виде

$$\begin{cases} \mathbf{x} = -\sigma x + r^{2} y, \\ \mathbf{y} = r^{2} x - \sigma y - xz, \\ \mathbf{x} = (r \sqrt{2} - 2\sigma)z + xy. \end{cases}$$
(3.7)

<u>Y</u>ПЗ: $\lambda < 0, \Rightarrow 2r^2 = 0, \Rightarrow \lambda = -(2\sigma + b)^2;$

Система (3.2) перепишется в виде

$$\begin{cases} \mathbf{x} = -\sigma x, \\ \mathbf{y} = -\sigma y - xz, \\ \mathbf{x} = -bz + xy. \end{cases}$$
(3.8)

В линейном приближении здесь реализуется устойчивый трехмерный узел.

Результаты расчетов представлены на рисунках:

Рис. 3.8 – результаты расчета классической системы (3.1) при значениях параметров: $r_1 = 3,2; r_2 = 5,2; \sigma_1 = 10$ H; $\sigma_2 = 1; \sigma_3 = 8/3; x_0 = 0; y_0 = 0,01; z_0 = 0$. Рис. 3.9 – результаты расчета системы (3.6) при значениях параметров:

$$r_1 = r_2 = 10; \ \sigma_1 = \sigma_2 = 4/3.$$

Рис. 3.10 – результаты расчета системы (3.7) при тех же значениях параметров, что у системы (3.6.)

Данные результаты показывают, что внутренняя динамика процесса чрезвычайно сложна. Тем не менее, данный подход позволяет ввести в обращение при оценке качества поверхностей фрактальные параметры. Более того, модели внутренней динамики дают возможность исследовать эволюцию структуры поверхностей.





Глава 4 Аналитическая теория трения

4.1. Моделирование трения

4.1.1. Степенное сопротивление

b = 1; n = 3



4.1.2. Кулоново трение b = 1; n = 0

-10

$$f(q) = b \cdot (|q|)^{n-1} \cdot q$$

4.1.3. Квадратичное сопротивление

b = 1; n = 2 $f(q) = b \cdot (|q|)^{n-1} \cdot q$



4.1.4. Линейное и кубическое сопротивление c = 2; d = 0.5

 $f(q) = c \cdot q + d \cdot q^3$



96

q

10



4.1.5. Линейное и кулоново трение c = 0.25; n = 0







4.1.6. Сухое трение

b = 100; c = 20; n = 0

$$f(q) = [b \cdot (|q|)^{n-1} \cdot q] - c \cdot q + d \cdot (q^3)$$



4.2. Диссипативные функции

В данном разделе используется терминология аналитической механики [25]:

 Q_i – обобщенные силы;

 q_i - обобщенные координаты;

обобщенные скорости;

Т - кинетическая энергия системы.

Известно, что для стационарных связей виртуальная мощность:

$$N = \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \mathcal{Q}_i,$$

n – число степеней свободы механической системы. Обозначим далее:

f – сила трения;

v – скорость движения системы.

Переход к обобщенным силам осуществляется то формулам:

$$Q_{i} = \sum_{\gamma=1}^{N} f_{\gamma} \frac{\partial v_{\gamma}}{\partial q_{\gamma}}, \qquad (4.1)$$

где $\gamma = 1...N$ - число элементов (точек) механической системы.

Кроме того:

$$\frac{\partial \overline{r_{\gamma}}}{\partial q_{i}} = \frac{\partial \overline{v}}{\partial q_{i}}$$
 ($\overline{r_{\gamma}}$ - радиус-вектор точки)

Рассмотрим 3 случая задания *f*.

4.2.1 Сухое трение



Здесь $f_{\gamma} = -\beta_{\gamma}$. Вычислим обобщенную силу (4.1):

$$\begin{split} Q_{i} &= \sum f_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} = -\sum \beta_{\gamma} \frac{\partial v_{\gamma}}{\partial q_{\gamma}} = -\frac{\partial}{\partial q_{\gamma}} \sum \beta_{\gamma} v_{\gamma} \\ & \overline{v}_{\gamma} = \sum \frac{\partial \overline{r}_{\gamma}}{\partial q_{i}} q_{i}^{\kappa} \\ Q_{i} &= -\frac{\partial}{\partial q_{\gamma}} \sum_{\gamma=1}^{N} \beta_{\gamma} \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} q_{i}^{\kappa} = \\ &= -\frac{\partial}{\partial q_{\gamma}} \sum_{i=1}^{n} q_{\gamma} \sum_{\gamma=1}^{N} \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} = -\frac{\partial}{\partial q_{\gamma}} \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} q_{\gamma}^{\kappa}, \\ & \beta_{i} = \sum \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}}; \end{split}$$

Обозначим:

 $\Phi_{_1} = \sum eta_i {
arrow} {f c}$ - это диссипативная функция.

Величина Φ_1 выражает скорость рассеивания энергии вследствие трения.

Обобщенная сила вычисляется так:

$$Q_i = -\frac{\partial \Phi_1}{\partial \phi_i}$$

Перепишем производную от кинетической энергии с учетом полученных результатов:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^{n} Q_i q_i^{\mathbf{x}} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \Phi}{\partial q_i^{\mathbf{x}}} q_i^{\mathbf{x}} = \Phi_1,$$

так как в рассматриваемом случае Φ_1 является однородным многочленом первой степени от обобщенных скоростей (использована теорема Эйлере об однородных функциях.)

Итак, получено<u>:</u>

 $f_{\gamma} = -\beta_{\gamma}$, - кулоново трение (сухое тре-

ние),

$$Q_{i} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{A}_{i}} \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} \mathbf{A}_{i}, \quad \boxed{Q_{i} = -\beta_{i}}$$
$$\beta_{i} = \sum \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} ,$$
$$\Phi_{1} = \sum \beta_{i} \mathbf{A}_{i},$$
$$\boxed{\frac{dT}{dt} = \mathbf{N} = -\Phi_{1}}$$

4.2.2 Вязкое трение





$$Q_{i} = \sum_{\gamma=1}^{N} f_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} = -\sum_{\gamma=1}^{N} \beta_{\gamma} v_{\gamma} \frac{\partial v_{\gamma}}{\partial q_{\gamma}} = -\frac{\partial}{\partial q_{\gamma}} \sum_{\gamma=1}^{N} \frac{1}{2} \beta_{\gamma} v_{\gamma}^{2} ,$$
$$v_{\gamma}^{2} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} q_{i}^{2} q_{\gamma}^{2}$$

$$Q_{i} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{i}} \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \beta_{ij} \mathbf{x}_{i} \mathbf{x}_{j}; \quad \beta_{ij} = \sum_{\gamma}^{N} \frac{1}{2} \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}},$$

$$Q_i = -\sum \beta_{ij} \phi_j^{x}$$

Обозначим:

$$\Phi_2 = \sum_i^n \sum_j^n \beta_{ij} \phi_{ij} \phi_{ij}$$
 , - это функция диссипа-

ции Рэлея (положительно определенная квадратичная форма).

С учетом обозначений:

$$Q_i = -\frac{\partial \Phi_2}{\partial q_i}$$

Найдем скорость рассеивания энергии:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \mathbf{q}_i^{\mathbf{x}} = -\sum \frac{\partial \Phi_2}{\partial \mathbf{q}_i^{\mathbf{x}}} \mathbf{q}_i^{\mathbf{x}} = -2\Phi_2$$

(Φ_2 – однородный многочлен второй степени) Окончательно запишем:

$$\begin{split} \hline f_{\gamma} &= -\beta_{\gamma} v_{\gamma} \\ Q_i &= -\frac{\partial}{\partial q_{Y}^{k}} \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \beta_{ij} q_{i} q_{\gamma} \\ \beta_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{\gamma}^{N} \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} , \\ \beta_{2} &= \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \beta_{ij} q_{i} q_{j} \\ \hline \frac{dT}{dt} &= N = -2\Phi_2 \end{split}$$

4.2.3 Квадратичное сопротивление



$$\begin{split} f_{\gamma} &= -\beta_{\gamma} v_{\gamma}^{2}, \\ \mathcal{Q}_{i} &= \sum_{\gamma=1}^{N} f_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} = -\sum_{\gamma=1}^{N} \beta_{\gamma} v_{\gamma}^{2} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} = \\ &= -\sum_{\gamma=1}^{N} \beta_{\gamma} v_{\gamma}^{2} \frac{\partial v_{\gamma}}{\partial q_{i}} = -\frac{\partial}{\partial q_{i}} \sum_{\gamma}^{N} \beta_{\gamma} \frac{1}{3} v_{\gamma}^{3} \\ v_{\gamma}^{3} &= \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \sum_{s}^{n} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{s}} q_{i} q_{j} q_{s}^{3}, \\ \mathcal{Q}_{i} &= -\frac{\partial}{\partial q_{i}} \sum_{\gamma}^{N} \frac{\beta_{\gamma}}{3} \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \sum_{s}^{n} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{s}} q_{i} q_{j} q_{s}^{3} = \\ &= -\frac{\partial}{\partial q_{i}} \sum_{\gamma}^{n} \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \sum_{s}^{n} \beta_{ijs} q_{i} q_{j}^{3} q_{s}^{5} \\ \beta_{ijs} &= \frac{1}{3} \sum_{\gamma}^{N} \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{s}} q_{s}^{3} \\ \overline{\mathcal{Q}_{i}} &= -\sum_{j}^{n} \sum_{s}^{n} \beta_{ijs} q_{j} q_{s}^{4} g_{s}^{4} g_{s}^{4} \\ \end{array}$$

Обозначим:

$$\Phi_3 = \sum_i^n \sum_j^n \sum_s^n \beta_{ijs}$$
 ффр

третьей степени,

$$\begin{split} Q_i = -\frac{\partial \Phi_3}{\partial q_i^{k}}, \\ \frac{dT}{dt} = \mathbf{N} = -\sum \frac{\partial \Phi_3}{\partial q_i^{k}} q_i^{k} \end{split}$$

Окончательно:

$$f_{\gamma} = -\beta_{\gamma} v_{\gamma}^{2}$$
- квадратичное сопротивление,

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} \sum_{s=1}^{n} \beta_{ijs} \varphi_{js} \varphi_{s},$$

$$\beta_{ijs} = \frac{1}{3} \sum_{\gamma}^{N} \beta_{\gamma} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{i}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{j}} \frac{\partial r_{\gamma}}{\partial q_{s}},$$

$$\Phi_{3} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \sum_{s}^{n} \beta_{ijs} \Phi_{ijs} \Phi_{ij$$

4.3. Методы теории катастроф 4.3.1 Бифуркация Хопфа

Кроме бифуркаций состояния равновесия в нелинейных динамических системах при изменении параметра может происходить перестройка - из особой точки может возникнуть предельный цикл. Эту перестройку называют бифуркацией Хопфа. Для иллюстрации перестроек рассмотрим в полярной системе координат систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = r\lambda \pm r^{3} \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega' \end{cases}$$
(4.2)

В этой системе задан закон изменения во времени радиальных координат.

Рассмотрим вариант:

$$\frac{dr}{dt} = r\lambda - r^3 \tag{4.3}$$



Здесь r=0 - точка притяжения





Это и есть бифуркация Хопфа (суперкритическая бифуркация рождена устойчивым предельным циклом с радиусом $r = \sqrt{\lambda}$) - это динамически устойчивая бифуркация аналогична статической бифуркации:





Отметим, что для статических бифуркаций <u>фокус всегда</u> <u>переходит в узел</u> в окрестности бифуркации.

4.3.2. Синтез нелинейной силы трения

При исследовании динамики трибологического взаимодействия в реальном режиме времени было установлено[22], что разрушение поверхности начинается в момент прохождения динамической системой точки бифуркации. В процессе испытаний систематически проводились оценки динамических моделей, соответствующих процессу трения; на каждом из этапов идентифицировались две системные характеристики: импульсная переходная и единичная переходная функции. На (рис. 4.3) в строке "переходные процессы фаз" представлены характерные единичные переходные функции, которые идентифицированы моделями в пространстве состояний. Во второй строке рисунка представлены соответствующие модели. Отметим, что каждой из фаз соответствуют свои значения коэффициентов демпфирования, собственных частот колебаний и качества поверхности.

На (рис. 4.4а) показаны зависимости коэффициентов демпфирования n (кривая 1) и частот собственных колебаний k (кривая 2)- (параметров сопротивления) от реализации фазы процесса.

По завершении каждой из фаз в базовых областях поверхности трибопар снимались профилограммы с целью определения качества поверхности, - использовались ППП Wavelet (Matlab).

Анализ экспериментальных данных позволил следующим образом объяснить "физику фаз "- третья строка (рис.4.3). В начальной фазе в контакт включены наружные поверхностные слои, состоящие из загрязнений, адсорбированных газов и окислов.



Рис. 4.3. Эволюция динамической системы

Здесь трибологическая характеристика определяется в основном коэффициентом демпфирования слоя γ (заштри-хованная область), а сам слой имеет толщину h и, кроме

того, его продукты заполняют впадины между высотами профиля поверхности, - упругость материала профиля в этой фазе играет минимальную роль. При переходе ко второй фазе, когда от наружных поверхностных слоев осталась функционировать только её часть между впадинами, включается в сопротивление упругая составляющая материала профиля поверхности (собственная частота колебаний k), а вязкое сопротивление характеризуется коэффициентом демпфирования $n < \gamma$. Наконец, в заключительной фазе профили поверхности становятся сдеформированными с упрочнением, а остатки поверхностного слоя не оказывают демпфирующего действия, и всё сопротивление определится упругой составляющей упрочненного материала профиля поверхности $\omega > k$.



Рис. 4.4. Изменение коэффициентов демпфирования и собственных частот

Каждой из фаз сопоставляется определенная динамическая система, которая характеризуется особыми точками (предпоследняя строка рисунка 4.3); здесь же (последняя строка рисунка 4.3) представлена эволюция матриц динамических систем.

Введем естественный параметр $\lambda = n^2 - k^2$ (рис.4.46). Сопоставим значения параметра с особыми точками фаз: при $\lambda < 0$ мы обнаруживаем точку притяжения (в линейных системах управления - это апериодическое звено); далее, на границе 1-ой и 2-ой фаз n = k, - это точка бифуркации Хопфа; затем следует устойчивый фокус - при $\lambda > 0$ (в линейных системах управления - это колебательное звено); наконец, по завершении 3-ей фазы процесса наблюдается центр (консервативное звено). Были рассчитаны статистические характеристики. В рассматриваемом случае первый момент (среднее значение) равен нулю. Второй момент зависит от значения управляющего параметра:

для
$$\lambda < 0 \langle r^2 \rangle = |\lambda| = n;$$

для $\lambda = 0 \langle r^2 \rangle = 0.338\sqrt{4D};$
для $\lambda > 0 \langle r^2 \rangle = D/2\lambda = D/2k,$

Таким образом, при трении скольжения, обнаружен (зарегистрирован) фазовый переход 2 рода, или бифуркация Хопфа, после чего начинается процесс изнашивания. Рассчитан масштаб явления, позволяющий учитывать появление дополнительной степени свободы.

В работах [22,23,26] показана также возможность оценивать вероятность перехода от процесса трения к процессу изнашивания.

Синтезирована сила трения:

$$F_H = \Omega[(x - y)^2 - \lambda](\mathcal{K} - \mathcal{K}),$$

где &- нижняя платформа, %- верхняя платформа, x – перемещение нижней платформы, y – перемещение верхней платформы, Ω - коэффициент пропорциональности, λ - управляющий параметр.

Модель трибосистемы выглядит так:



Рис.4.5. Расчетная схема системы

Построена система нелинейных дифференциальных уравнений:

$$m_1 = -F_H + C_1(x_0 \sin pt - x)$$

 $m_2 = -F_H + C_2 y$,

где m_1 -приведённая масса нижней платформы, m_2 - приведённая масса верхней платформы, C_1 - упругая связь нижний платформы, C_2 - упругая связь верхней платформы, x_0 - амплитуда кинематического возбуждения, p - частота кинематического возбуждения.

Литература к части 1

- 1. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов М: «Мир» 1971.- 408с.
- 2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования – М; «Наука», 1972. 768с.
- 3. *Богданович П.Н., Прушак В.Я.* Трение и износ в машинах. Минск Высшая школа, 1999.
- Ганевский Г.М., Голдин И.И. Допуски, посадки и технические Измерения в машиностроении: Учебник для нач.проф. образования. М.: Профобриздат ИРПО 2001. -288с.
- 5. *Горячева И.Г.*Механика фрикционного взаимодействия.-М.:Наука,2001.-478с.
- Дьяконов В., Круглов В. МАТLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник – СПб, Питер, 2002. -448с.
- 7. Дьяконов В., Абраменкова И. МАТLAB. Обработка сигналов и изображений.СПб.:Питер,2002.-608с.
- 8. Исмаилов Г.М., Соханёв Б.В., Мусалимов В.М. Устройство для испытаний материалов на трение – А.С. №1821689. Опубл. в Б.И. 1993,№22

- Мусалимов В.М., Ларичкин М.П., Аникеенко А.Д., Супрун Н.А., Исмаилов Г.М., Струк А.Н. Компьютерные технологии оцифровки экспериментальных данных В кн.Труды пятой сессии международной научной школы "Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем", СПб,2002,ИПМаш РАН,с.151-156.
- Мусалимов В.М., Лертрунгруанг К., Супрун Н.А.Оценка точности скачков коэффициентов демпфирования при критической скорости загружения трибологических пар. В кн. Труды четвертой сессии международной научной школы "Современные фундаментальные проблемы и прикладные задачи теории точности и качества машин, приборов и систем", СПб, 2001, ИПМаш РАН, с. 132-143.
- 11. Мусалимов В.М., Валетов В.А., Ларичкин М.П., Аникеенко А.Д., Третьяков С.Д. Идентификация динамики процесса циклического изнашивания
- 12. *Макаров Н.Н., Осипов В.В., Шабалина М.Б.* Нормирование точности в машиностроении: Учебник для машиностроительных спец. вузов – М: Высш.шк.,2001.-335с.
- 13. Пановко Я.Г.Основы прикладной теории колебаний и удара.Л., Машиностроение, 1976.320с.
- 14. Пинчук Л.С. Основы конструирования машин. Основы трибологии . Учебное пособие для студентов машиностроительных вузов.- Гомель, ГПИ им.П.О.Сухого, 1996, 79 с.
- 15. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов.М.:ДМК Пресс,2005.-304с.
- 16. Справочник по триботехнике.В 3 т. Т.1.Теоретические основы.-М:Машиностроение.1989.-400с.
- 17. Сычев В.В.Вычисление корреляционной размерности, корреляционной энтропии и показателя Херста по временному ряду данных. Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, 2002.
- 18. *Федер Е.*Фракталы.-М.:Мир,1991.
- 19. *Чихос Х.* Системный анализ в трибонике.М.:Мир,1982, 352с.
- 19А.Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей.-М.:Машиностроение,1979.-264с.
- 20. Шустер Г. Детерминированный хаос.М.:Мир,1988.-240с.

- 21. *Юревич Е.И.* Теория автоматического управления. Л: «Энергия» 1969, 375с.
- 22. V.M. Musalimov, Y.V. Lisitin, S.V. Orlov. Dynamic characteristics and quality surveillance of rubbing surfaces. Proceedings ICTAM04, Warschawa, 2004.
- 23. *Musalimov V.M. and Musalimova L.N.* Non-Linear Dynamics of Frictional Interaction. IMA International Conference. Recent Advances in Nonlinear Mechanics. Book of Abstracts. Aberdeen, Scotland, 2005, p.76.
- 24. Патент на изобретение № 2244290 (Мусалимов В.М., Исмаилов Г.М., Аникеенко А.Д., Ларичкин М.П., Власов Ю.А.). Опубл.Бюл.2005,№1.
- 25. Бутенин Н.В., Фуфаев Н.А.Введение в аналитическую механику.М.:Наука.1991.-256с.
- 26. *Мусалимов В.М.Лисицын.Ю.В., Трухин М.М.* Пути автоматизации контроля качества поверхности в реальном режиме времени. НТ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО № 16,2004,с.26-29.

ЧАСТЬ 2

МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Предисловие

Процессы, происходящие при контактном взаимодействии поверхностей настолько сложны и многообразны, что многочисленные и многолетние исследования до настоящего времени не сумели раскрыть все их закономерности. В первой части данной публикации излагаются, в основном, теоретические аспекты исследования процессов трения поверхностей друг о друга с учетом различных факторов, влияющих на эти процессы.

Одним из факторов, наиболее существенно влияющим на вышеуказанные процессы, является микрогеометрия поверхностей. Во второй части данной публикации изложен принципиально новый подход к оценке и контролю микрогеометрии поверхностей деталей. Заметим при этом, что оценка и контроль микрогеометрии имеют существенное значение не только для оценки контактного взаимодействия поверхностей, но и используются в процессах проектирования и изготовления изделий в большинстве отраслей промышленности, в первую очередь в приборо- и машиностроении.

Глава 1 Оптимизация микрогеометрии поверхностей для их конкретных функциональных свойств

Повышение качества выпускаемой продукции является важнейшей задачей промышленности. Эта задача особенно актуальна в приборостроении.

Общепризнанно, что работу любого изделия определяет, в основном, точность размеров, формы и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей деталей, а также состояние их поверхностного слоя. Наименее исследованными остаются проблемы, связанные с оптимизацией микрогеометрии поверхностей и обеспечением простого, надежного и дешевого ее контроля. Актуальность данной проблемы объясняется еще и тем, что в мировой практике возможности повышения качества изделий за счет увеличения точности размеров и формы поверхностей почти исчерпаны и связаны со значительным увеличением затрат (см. рис. 1.1).



Рис. 1.1. Зависимость стоимости изготовления изделия от точности его изготовления

Поэтому создание оптимального микрорельефа функциональных поверхностей деталей, наряду с улучшением других характеристик поверхностного слоя, является одним их основных и наиболее эффективных резервов значительного повышения качества изделий.

Отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии поверхностей направлены на решение проблем с помощью параметрического описания профиля или поверхности. Большая часть исследований базируется на стандартных критериях, которые определяют лишь отдельные, в основном усредненные, характеристики отклонений реальных поверхностей от идеальных [24-37,42-48].

В настоящее время установлено около 20 различных функциональных свойств поверхности, на которые существенно влияет ее микрогеометрия (адгезия, электрическая проводимость, трение- скольжение и качение и т.д.), поэтому необходима оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей для этих конкретных функциональных свойств. Такую задачу невозможно решить без полного и точного описания оптимальной микрогеометрии на этапе ее нормирования.

В большинстве стран мира стандарты на микрогеометрию поверхности деталей построены на использовании для ее оценки и контроля профилей поверхностей, т.е. сечений поверхности плоскостью. Для этих целей созданы и производятся в массовом количестве приборы так называемого ощупывающего типа, оснащенные, в основном, индукционными датчиками. Многочисленные семейства этих приборов отличаются друг от друга габаритами, количеством вычисляемых параметров, стоимостью и т.п., но все они работают по принципу "ощупывания" контролируемой поверхности алмазной иглой индукционного датчика, повторяющей при ее протаскивании по поверхности выступы и впадины последней. Полученный таким образом профиль обрабатывается по соответствующей программе, в результате чего определяют значения различных параметров профиля и некоторые результаты его статистической обработки в графическом изображении. Практика применения таких приборов показывает, что большинство специалистов используют для оценки микрогеометрии поверхности один профиль, не задумываясь особо ни о его направлении, ни даже о его длине. В связи с этим, целесообразно рассмотреть понятия стационарности микрогеометрии и статистически представительной длины профиля.

1.1. Стационарность микрогеометрии поверхностей

В настоящее время микрогеометрию поверхностей деталей, в частности ее шероховатость, оценивают с помощью профиля - сечения поверхности какой-либо плоскостью.

Остановимся лишь на некоторых практических аспектах этого достаточно хорошо изученного вопроса. Во-первых, в каком направлении следует записывать профиль поверхности, чтобы выразить ее существенные свойства, во-вторых, сколько профилей и в каких направлениях необходимо проанализировать, чтобы полностью охарактеризовать поверхность [1, 2, 3].

Ответы на эти вопросы связаны с изотропией поверхности. Если поверхность можно принять за изотропную, то направление снятия профилей не имеет значения, так как в этом случае любые профили должны в статистическом смысле давать одинаковые результаты. Таким образом, информация любого профиля достаточной длины содержит полную информацию о геометрических свойствах поверхности. Это утверждение теоретически доказуемо [43]. Если поверхность анизотропна, то в общем случае для полной ее оценки необходимо записать 5 непараллельных профилей. Этот вопрос подробно рассмотрен многими авторами, в частности в работах [45, 46], и для большого числа анизотропных поверхностей существенно упрощен. Доказано, что на поверхностях, где отчетливо видна направленность следов обработки, профили, записанные в направлении этих следов и в направлении, перпендикулярном к ним, дают полную информацию о геометрических свойствах поверхности.

Практически для установления типа поверхности достаточно произвести ее осмотр невооруженным глазом или с помощью лупы. Если при осмотре не обнаружено продольно направленных кратеров или возвышений, то поверхность с достаточной точностью можно рассматривать как изотропную. Когда встречаются следы продольной формы только в одном направлении, для оценки микрогеометрии поверхности достаточно использовать 2 профиля, записанных поперек и вдоль следов обработки. Если же встречаются ярко выраженные следы обработки в двух и более перекрещивающихся направлениях, то необходимо применять общий подход, т.е. записывать не менее 5 профилей.

Таким образом, чисто теоретически данный вопрос решается однозначно, но на практике дело обстоит гораздо сложнее, поэтому целесообразно ввести понятие стационарности поверхности. По аналогии с понятиями случайных процессов введем следующие определения.

Поверхность будем считать стационарной в узком смысле, если профили, записанные в различных ее местах, но в одном направлении, в существенных свойствах согласовываются между собой, т.е. вычисленные по ним значения среднеарифметических отклонений, средних длин волн, радиусов выступов и впадин и т.д. практически одинаковы.

Поверхность будем считать стационарной в широком смысле если профили, записанные в различных местах, но в одном направлении, показывают только одинаковые среднеарифметические высоты, например R_a, и автокорреляционные функции. Для обеспечения постоянства автокорреляционной функции в первом приближении достаточно добиться постоянства средней длины волны профиля.

Из определений стационарности поверхности становится ясным, что она должна быть стационарной по меньшей мере в широком смысле, чтобы с помощью одного или максимум двух профилей можно было достаточно полно охарактеризовать ее свойства.

Следует иметь в виду, что не все реальные поверхности удовлетворяют условиям стационарности даже в широком смысле.

Отметим, что профили с различной фильтрацией показывают при их обработке различные результаты, поэтому необходимо знать, какова должна быть фильтрация профиля, чтобы обеспечить достоверную информацию об интересующем нас функциональном свойстве поверхности.

Опыт показывает, что теория «одного профиля» не решает задачу оптимизации микрогеометрии, кроме прочего, из-за повсеместного использования параметрических критериев ее оценки и контроля [4, 5, 8, 17, 18, 39, 40]. Для иллюстрации и доказательства справедливости такого заключения достаточно одного простейшего примера. На рисунке 1.2 представлены 2 профиля, являющихся зеркальным отображением друг друга.



Рис. 1.2 Профили двух зеркально противоположных поверхностей

Как видно из рисунка, практически все стандартные критерии (R_a, R_z, R_{max} и т.д.) для обоих профилей абсолютно одинаковы. Однако очевидно, что функциональные свойства таких поверхностей просто не могут быть одинаковыми. Следует добавить, что существует сколь угодно много различных профилей, у которых значение стандартных параметров одинаковое. Это практически означает, что, с одной стороны, для каждого профиля существует единственное значение любого параметра, но не наоборот. Т.е., задавая на чертеже любое конкретное значение параметра шероховатости, мы можем при обработке поверхности, обеспечивая указанное в чертеже значение параметра, получить любой из многочисленных возможных микрорельефов, которые могут обладать разнообразными функциональными свойствами.

При использовании любой технологии получения поверхностей деталей на формирование микрорельефа оказывают влияние многочисленные факторы, включая чисто случайные, независимые друг от друга. Это практически означает, что профиль реальной поверхности можно рассматривать как реализацию случайной функции, а саму микрогеометрию – как реализацию случайного поля. Из математики известно, что для полного параметрического опи-

сания случайной функции необходимо от 3 до 25 параметров [1, 14, 17, 18, 40]. Очевидно, что, используя в большинстве случаев при нормировании микрогеометрии одиночные критерии, чаще всего R_a, R_a или R_z, мы ни теоретически, ни практически не предопределяем тот микрорельеф, который случайным образом реализуется в результате обработки поверхности, не смотря на обеспечение количественного значения нормированного критерия. Для полного и точного описания реального профиля в среднем требуется 10-15 различных параметров. Теоретически это возможно, но практически абсолютно не реально. А это означает, что использование параметрических критериев не позволяет оптимизировать микрогеометрию поверхности, даже в том случае, если эта оптимальная микрогеометрия заранее известна. Таким образом, улучшить функциональные свойства поверхности за счет оптимизации ее микрогеометрии мы можем лишь чисто случайно и уж точно не сможем повторить удачный случай с помощью стандартных парамет-DOB.

Независимо от методов оценки и контроля микрогеометрии, при использовании для этой цели приборов ощупывающего типа, очень остро стоит проблема фильтрации профилей.

1.2. Дискретизация и фильтрация профилей поверхностей

1.2.1. Дискретизация профиля

Все серийные приборы ощупывающего типа на выходе имеют аналоговый сигнал профиля. Для всестороннего исследования микрогеометрии стандартных критериев недоснеобходимо профилографытаточно, поэтому профилометры соединять с персональными компьютерами через соответствующие АЦП [4, 5, 17]. При этом необходимо устанавливать конкретную дистанцию дискретизации (расстояние между 2-мя соседними точками профиля по его длине). Очевидно, что с теоретической точки зрения, чем меньше дистанция дискретизации, тем точнее дискретное представление профиля. Однако, в данном случае имеется естественное ограничение, которое определяется заострением алмазной иглы датчика. Впадины, меньшие по размерам, чем заострения иглы механически фильтруются этой иглой, а значит, вступает в силу известное правило - дистанция дискретизации не должна быть меньше радиуса заострения иглы датчика, так как в противном случае при дискретизации аналогового сигнала будут учитываться помехи, не имеющие ничего общего с профилем поверхности.

Особое внимание следует уделять проблеме фильтрации профиля, полученного с помошью профилографа - профилометра [2, 5, 7, 13]. Помимо внутренних помех прибора существует множество внешних помех, влияние которых тем большее, чем выше чувствительность прибора при записи профиля (речь идет о вертикальном увеличении сигнала, которое у серийных приборов может изменяться от 100 до 200 тыс. крат). При контроле, например, тонко шлифованных или полированных поверхностей необходимо устанавливать вертикальное увеличение прибора не менее чем 10 тыс. крат. При такой чувствительности игла датчика колеблется не только от вибрации фундамента или стола, на котором установлен прибор, но и от вибрации воздуха, вызванной разговорами недалеко находящихся людей. В реальных городских и, особенно, производственных условиях невозможно оградить работу профилографа- профилометра от воздействия различного рода внешних помех. Это делает проблему правильной фильтрации аналогового сигнала профиля чрезвычайно актуальной. Наиболее предпочтительной представляется методика фильтрации профиля с помощью его амплитудного спектра.

1.2.2. Фильтрация профиля

Профиль поверхности представляет собой реализацию случайной функции и может быть разложен в ряд Фурье. Графическая зависимость амплитуды гармоник от их частоты есть не что иное, как амплитудный спектр профиля. Теоретически доказано и экспериментально многократно подтверждено [17], что самая низкочастотная гармоника содержит информацию об отклонениях формы поверхности. Вторая и третья гармоники содержат информацию о так называемой волнистости. Падающая часть спектра несет в себе информацию о шероховатости профиля. Незатухающая высокочастотная часть спектра несет в себе информацию о помехах (Рис. 1.3). Удаляя из амплитудного спектра любую из выше названных частей информации (одну или

несколько) после обратного преобразования Фурье мы получаем профиль без исключенных составляющих информации.



Рис. 1.3 Амплитудный спектр профиля точеной поверхности

Таким образом, мы можем оставить толко шероховатость, или только волнистость или только отклонения формы, или только помехи, или любую комбинацию этих компонентов. Не смотря на условность деления отклонения реальной поверхности от идеальной на отклонение формы, волнистость и шероховатость поверхности, с метрологической точки зрения это разделение просто необходимо, т.к. указанные отклонения сильно отличаются друг от друга по величине и не могут измеряться в одинаковом масштабе. Например, даже существенные изменения шероховатости на фоне отклонений формы будут практически незаметны и не разделение этих компонентов по метрологическим соображениям приведет к некорректным выводам по результатам исследований. В качестве примера, на рисунке 1.4 приведены амплитудные спектры не отфильтрованного профиля и спектр помех.

На рисунке 1.5 (слева) представлен нефильтрованный профиль точеной поверхности и его амплитудный спектр, а

на рисунке 1.5 (справа) - амплитудный спектр с исключенной волнистостью и отклонением формы и полученный при обратном преобразовании Фурье отфильтрованный профиль.



Рис. 1.4 Амплитудные спектры: а) профиля; б) использованной цепи приборов

Этот метод фильтрации способствует также ускорению процессов измерения и контроля шероховатостей, т.к. исключает необходимость тщательной горизонтальной выверки исследуемой. Просто для наклонно записанного профиля из его амплитудного спектра достаточно исключить самую низкочастотную гармонику и после обратного Фурьепреобразования будем иметь такой же профиль, как и при идеально выставленной в "горизонт" контролируемой поверхности.



Рис 1.5 Профиль и его амплитудный спектр с учетом волнистости (слева) и без учета волнистости (справа)

На рисунке 1.6 (слева) показан профиль, записанный при наклонном положении поверхности к горизонту, а на рисунке 1.6 (справа) показан тот же профиль после исключения из амплитудного спектра самой низкочастотной гармоники и обратного преобразования Фурье.



Рис. 1.6 Профиль поверхности, записанный под наклоном к горизонту (слева) и тот же профиль, полученный после удаления из амплитудного спектра низкочастотной гармоники (справа)

Этот метод позволяет решить еще одну очень важную задачу - фильтрацию профиля применительно к конкретному функциональному свойству поверхности. Дело в том, что на каждое конкретное функциональное воздействие реагирует (его воспринимает) не совокупное отклонение реальной поверхности от идеальной, а только какая-то часть этих отклонений. Это значит, что другая часть отклонений просто не реагирует на данное функциональное свойство и под его воздействием никак не изменяется. Очевидно, что при исследовании влияния различных факторов на интересующее нас функционал Макемана поверхности мы должны учитывать и рассматривать только отклонения, которые изменяются при данном Функциональном воздействии. С помощью амплитудного спектра эта задача решается чрезвычайно просто и при этом - точно. Достаточно снять профили с испытуемой поверхности до функционального воздействия на нее и после и построить для этих профилей соответствующие амплитудные Эспектры. "Не работающая" часть отклонений остается нейзменной после функционального воздействия и поэтому должна быть отфильтрована для данного вида исследований, чтобы изменения "работающей" части отклонений могли быть лучше замечены и зафиксированы.

1.3. Оптимизация микрогеометрии поверхностей

Говорить об оптимизации микрогеометрии для конкретного функционального свойства поверхности можно только с теоретической точки зрения. Практически речь может идти только о выборе наилучшей микрогеометрии из возможных, которые можно получить в конкретных производственных условиях. Поэтому в дальнейшем понятие оптимизации будет означать выбор наилучшего из практически возможных вариантов микрогеометрии поверхности для ее конкретного функционального свойства.

Решение такой задачи возможно при выполнении следующих условий:

> оптимальную микрогеометрию для конкретного функционального свойства нужно знать;

> известную оптимальную микрогеометрию нужно при нормировании на чертеже точно описать;

> технолог должен знать возможные варианты обеспечения заданной оптимальной микрогеометрии (знать и виды, и режимы обработки, гарантирующие получение оптимальной микрогеометрии);

> – необходимо наличие методов и средств быстрого простого и надежного измерения и контроля соответствия реально полученной микрогеометрии - заданной (оптимальной).

Рассмотрим последовательно методики приемлемой реализации этих условий.

МКМ

1.3.1 Методика определения оптимальной микрогеометрии для конкретного функционального свойства поверхности <u>Л</u>

Для исследования влияния исходной микрогеометрии на конкретное функциональное свойство поверхности изготавливается максимально возможное количество испытуемых образцов, которые будут отличаться только исходной микрогеометрией. Это практически означает, что изготавливаются образцы одинаковых размеров и формы, желательно стандартных, из одной и той же партии конструкционного материала, обладающего практически одинаковыми

химическими, физическими, механическими и технологическими свойствами. Для создания разного исходного микрорельефа на каждом образце используются разные, из доступных, методы и режимы обработки. Для исключения влияния побочных факторов, например, влияния разной степени наклепа, все образцы после создания на них разного исходного микрорельефа целесообразно подвергнуть термообработке для снятия остаточных напряжений. Для повышения достоверности эксперимента, для каждого варианта исходного микрорельефа целесообразно изготовить несколько одинаковых образцов. Все изготовленные вышеуказанным способом образцы подвергаются одинаковому функциональному воздействию с контролем величины характеристик этого функционального свойства. В результате испытаний выявляются образцы, показавшие различный уровень функционального свойства поверхности, в том числе и наивысший. Микрорельеф такого наилучшего образца принимается в качестве оптимального для данного функционального свойства.

Примечание: при изготовлении образцов с разной исходной микрогеометрией виды и режимы обработки каждого образца должны быть зафиксированы.

1.3.2. Методика технологического обеспечения микрогеометрии

Как указывалось в предыдущем параграфе, при изготовлении образцов для испытаний виды и режимы их обработки должны быть зафиксированы. Определив в результате эксперимента наилучший их возможных микрорельефов для данного функционального свойства поверхности, мы автоматически получаем и технологические методы его воспроизведения. База данных по установлению оптимальной микрогеометрии и технологических методов ее обеспечения со временем может настолько наполниться, что не потребуется проведение специальных экспериментов, а можно будет воспользоваться уже имеющимися в базе данных сведениями. Как указывалось в разделе 1.1, точное параметрическое описание микрогеометрии при ее нормировании практически не реализуемо, а значит, не реализуем и параметрический метод простого и надежного контроля соответствия полученной микрогеометрии оптимальной (заданной). Решение проблемы оптимизации микрогеометрии потребовало разработки принципиально нового подхода к самой проблеме. Такая разработка привела к созданию нового научного направления в оптимизации микрогеометрии, в котором для оценки и контроля микрогеометрии используются так называемые непараметрические критерии. В качестве таких критериев предложены графические изображения некоторых функций, вплоть до графического изображения самого профиля, а в идеале - графического изображения микротопографий поверхности. Изложим кратко суть непараметрического подхода. Как указывалось выше, профили реальных поверхностей с точки зрения математики представляют собой реализацию случайных функций. Из математики же известно, что наибольшей информацией о профиле, как о случайной функции, обладают функции плотности распределения его ординат и углов наклона. Отсюда следует вывод о целесообразности использования этих функций в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхности. Известно также, что эти функции могут быть представлены или аналитически (в виде формул), или параметрически (набором соответствующих параметров), или графически (в виде графика). Приемлемой методики использования аналитического представления пока не найдено, тем более что для большинства реальных профилей аналитическое представление указанных выше функций возможно только в виде эмпирических зависимостей, установление которых, во-первых, не просто, во-вторых, пока не ясно, как это аналитическое представление можно практически использовать в качестве критериев. Параметрическое представление функций не приемлемо по указанной выше причине, т.е. для точного параметрического описания функций требуется много параметров. Разработан и проверен многочисленными экспериментами метод использования графического представления функций плотности распределения ординат и углов наклона профиля. Заметим сразу, что метод использования графических представлений различных функций позволяет использовать в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии и графики функций распределения ординат и углов наклона профиля, и графики опорных кривых профиля (кривых Аббота), и непосредственно графических

изображений самих профилей, и, в идеале, - микротопографий поверхности.

1.3.3. Методика контроля оптимальной микрогеометрии с использованием непараметрических критериев

До испытаний серии образцов, подготовленных в соответствие с разделом 1.3.1. на конкретное функциональное воздействие, с рабочей поверхности каждого образца необходимо снять профиль, по соответствующей программе обработать его на компьютере и результаты обработки завести в базу данных.

Любой непараметрический критерий, например, график функции плотности распределения ординат профиля или кривую Аббота, полученный для профиля лучшего по результатам испытаний образца следует использовать в качестве эталона. В зависимости от степени важности изделия можно установить любой конкретный допуск на отклонение непараметрического критерия контролируемого образца от эталонного критерия (см. рис 1.7)



Рис. 1.7 Эталонная плотность распределения ординат профиля с допуском на возможные ее отклонения

При контроле микрогеометрии любого серийного образца достаточно совместить соответствующий непараметрический критерий, полученный для его профиля, с эталоном. Если графическое изображение непараметрического критерия не выходит за пределы допуска относительно эталона, контролируемую микрогеометрию следует отнести к удовлетворительной. При выходе непараметрического критерия контролируемой микрогеометрии за пределы допуска изделие следует браковать по требованиям к шероховатости поверхности.

Для неответственных изделий целесообразно использовать менее информативные, но более простые в графическом изображении опорные кривые профиля (кривые Аббота) или функции распределения ординат и углов наклона профиля. Для изделий с жесткими эксплуатационными характеристиками, существенно зависящими от микрогеометрии функциональных поверхностей, в качестве непараметрических критериев следует использовать графики функций плотности распределения ординат или углов наклона профиля, а еще лучше - графические изображения самого профиля или микротопографии поверхности. В последнем случае мы как бы возвращаемся к эталонам шероховатости, но процесс сравнения с эталоном поручаем не человеческому глазу, а компьютеру, что весьма существенно, т.к. исключает субъективизм в оценке.

При использовании любых графических изображений в качестве непараметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии не существует технических трудностей для автоматизации процесса контроля.

1.3.4. Методика нормирования микрогеометрии поверхностей с использованием непараметрических критериев

Как указано выше, до настоящего времени установлено существенное влияние микрогеометрии на два десятка функциональных свойств поверхности. Для нормирования оптимальной микрогеометрии необходимо каждому такому функциональному свойству присвоить постоянный номер. Этот номер следует проставлять на знаке шероховатости, форма которого не имеет принципиального значения, вместо не имеющих практического смысла параметрических критериев. Таким образом, вместо нормирования не отражающих функциональных свойств поверхностей параметров следует нормировать конкретное функциональное свойство поверхности. Эта методика содержит в себе дополнительную внутреннюю логику. Если современный конструктор, проставляя на чертеже значения каких- либо параметров шероховатости, иногда даже не знает их сущности, то нормирование функциональных свойств исключает такое "слепое" нормирование. Многие конструкторы могут забыть физический смысл используемых ими параметров шероховатости, в основном в силу их практической бессмысленности, но трудно себе представить конструктора, который не знает функционального назначения создаваемого им изделия. Это является еще одним существенным доказательством целесообразности нормирования микрогеометрии по функциональным свойствам поверхности.

В этой проблеме есть еще один важный нюанс. Действующие стандарты обязывают нормировать, а значит, и контролировать, микрогеометрию всех, без исключения, поверхностей деталей. Какой смысл нормировать и контролировать микрогеометрию нефункциональных поверхностей или поверхностей, функциональные свойства которых не зависят или не существенно зависят от их микрогеометрии? Это еще один довод в пользу целесообразности коренного изменения стандартов на микрогеометрию поверхностей деталей приборов и машин.

1.4. Обоснование целесообразности внедрения непараметрических методов оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей

Сущность непараметрических методов оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей впервые обоснована в 1976 году [1]. Этот метод еще не стандартизован, но, как выразился один из инженеров фирмы "Шнеебергер", потребителю продукции не важно, стандартным или не стандартным методом улучшено ее качество. Пользуясь изложенными в данной работе методиками, можно без особых затрат и без всякого риска сможете улучшить любые функциональные показатели продукции, существенно зависящие от микрогеометрии функциональных поверхностей деталей.

1.5. Условия практической применимости непараметрических критериев

Для практического использования непараметрических критериев достаточно обеспечить два основных условия:

1. обеспечение технической возможности простого, быстрого и надежного получения этих критериев;

2. непараметрические критерии должны быть технологически управляемы, что означает возможность их изменения с помощью изменения видов и режимов обработки функциональных поверхностей.

Обеспечение первого условия не представляет никаких ни технических, ни экономических проблем. Все современные приборы ощупывающего типа имеют аналоговый выход и с помощью АЦП подключаются к любому современному компьютеру. Программный продукт для получения непараметрических критериев легко создается любым профессионалом- программистом. Таким образом, соединение профилографа- профилометра с компьютером создает измерительно- вычислительный комплекс, решающий все задачи измерения и контроля шероховатости поверхностей, включая использование стандартных параметров шероховатости. На рис. 1.8 показана фотография такого комплекса, созданного на кафедре "Технология приборостроения" СПбГУ ИТМО.

Технологическую управляемость непараметрическими критериями нет необходимости доказывать. В процессе любого эксперимента можно убедиться, что малейшие изменения профиля поверхности дают заметное изменение графика функций плотности распределения его ординат или углов наклона. Даже менее информативные критерии, такие как графики функций распределения ординат и углов наклона профиля или графики кривых Аббота, заметно изменяются при незначительном изменении параметров обработки поверхности.

При использовании непараметрических критериев имеют практическое значение оценка стационарности микрогеометрии и определение базовой длины профиля. Если непараметрический критерий оказывается одинаковым для профилей одинаковой длины снятых в различных местах поверхности и в различных направлениях, то микрогеометрия такой поверхности является стационарной в узком смысле и для ее оценки или контроля достаточно одного профиля, снятого в любом месте и в любом направлении. Для определения статистически представительной базовой длины целесообразно проводить следующие эксперименты: строить и сопоставлять непараметрические критерии для различных длин профилей, начиная с самого малого. Та длина, с превышением которой непараметрический критерий перестанет изменяться, и будет статистически представительной или базовой длинной профиля.



Рис. 1.8 Измерительно-вычислительный комплекс "Профиль"

С тем же результатом эксперимент можно проводить в обратном направлении. В этом случае, постепенно уменьшая заведомо большую начальную длину профиля, фиксируем тот момент, когда при очередном уменьшении длины профиля изменится непараметрический критерий. В качестве базовой длины следует принимать последнюю, при которой непараметрический критерий еще не изменялся.

1.6. Методика получения безразмерного профиля

Практически удобнее вместо плотности распределения и функции распределения углов наклона профиля использовать соответствующие функции тангенсов углов наклона профиля. Операция получения тангенсов углов наклона легко и просто программируется, а характер изменения тангенсов углов наклона полностью повторяет характер самих углов. При использовании в качестве непараметрических критериев графических изображений плотности распределения и функций распределения ординат профилей, может возникнуть так называемая масштабная проблема [6]. Суть ее в следующем. Если в процессе исследований требуется расширить поиск оптимальной микрогеометрии от минимальных отклонений, например, в тыс. долях микрометра, до максимальных отклонений, например в несколько десятых мм., то графическое изображение этих функций в одинаковом масштабе практически невозможно. Для преодоления таких трудностей предлагается методика получения безразмерного профиля. Здесь для каждого реального профиля определяется среднеквадратическое отклонение его ординат и все ординаты профиля делятся на величину этого среднеквадратического отклонения, делая все ординаты безразмерными величинами. Так как деление всех ординат на одну и ту же величину не изменяет геометрического характера профиля по высоте, то использование безразмерных профилей легко решает так называемую масштабную проблему. Следует заметить, что при контроле соответствия получаемой микрогеометрии ее оптимальному значению с помощью выше указанных критериев масштабная проблема не возникает, т.к. практически отклонений контролируемой шероховатости, в десятки раз отличающейся от оптимальной, не бывает.

1.7. Экономические аспекты оптимизации микрогеометрии поверхности

Очевидно, что оптимизировать микрогеометрию поверхности имеет смысл только в том случае, если она существенно влияет на интересующее нас функциональное свойство поверхности. Если такого влияния нет, или оно неизвестно, то не только оптимизация, но и нормирование микрогеометрии лишено практического смысла. В связи с этим требование современных стандартов об обязательном нормировании микрогеометрии всех поверхностей детали является просто нелепым.

В процессе многочисленных исследований по поиску оптимальной микрогеометрии для различных функциональных свойств неоднократно оказывалось, что оптимальная шероховатость грубее той, которая была указана на чертеже изделия. Это практически означает, что оптимальную микрогеометрию можно получать более грубыми, а значит и более дешевыми методами обработки. Таким образом, в среднем затраты на получение оптимальной микрогеометрии можно признать одинаковыми с затратами на обеспечение нормируемых параметров шероховатости. Затраты на проведение эксперимента по поиску оптимальной микрогеометрии не могут считаться существенными и быстро окупятся за счет существенного улучшения эксплуатационных свойств изделия. Следует также иметь в виду, что накопление базы данных по оптимальной микрогеометрии для различных функциональных свойств со временем вообще исключат необходимость в дополнительных экспериментах. К тому же заметим, что рекомендуемые в справочниках значения параметров шероховатости тоже потребовали в свое время проведения немалого количества экспериментов, а практический выход близок к нулю.

Глава 2

Экспериментальная проверка эффективности непараметрических методов оценки и контроля микрогеометрии поверхностей

В первой главе обоснована несостоятельность параметрического подхода к оценке и контролю микрогеометрии. Несостоятельность следует из практической невозможности оптимизации микрогеометрии поверхностей для их конкретных функциональных свойств. Тем самым остается неиспользованной возможность повышения качества изделий за счет такой оптимизации. В первой главе обосновано также не только преимущество непараметрического подхода в решении проблемы оптимизации микрогеометрии, но и представлены разработанные методики реализации этого процесса. В настояшей главе приводятся результаты экспериментальных исследований, в которых использованы как стандартные параметрические, так и непараметрические методы оценки и контроля микрогеометрии. Сопоставление результатов, полученных этими разными методами, убедительно свидетельствуют как о преимуществах непараметрического подхода, так и о простоте его технической реализации.

2.1 Исследование взаимосвязи микрогеометрии и функциональных свойств поверхности

В первой главе указано, что оценка микрогеометрии поверхности по ее профилю является основой для теоретических исследований рабочих поверхностей функциональных деталей машин и приборов, а также для контроля их в производственных условиях.

В последнее время были сделаны попытки заменить алмазную иглу ощупывающих приборов сканирующим лучом. Для этого необходимо найти практически приемлемый способ преобразования энергии светового луча в электрическую и решить много сложных технических задач. Полученные результаты пока свидетельствуют лишь о принципиальной возможности их решения. Однако создание оптимальных микрорельефов поверхностей для их конкретных функциональных свойств - настоятельная необходимость сегодняшнего дня. Рассмотрим возможности практического решения проблемы с помощью профильных критериев микрогеометрии.

На базе профильных ощупывающих приборов в нашей стране и за рубежом созданы установки, позволяющие получать микротопографию поверхности и поверхностные критерии шероховатости.

Чтобы оценить целесообразность и практическую приемлемость получения и использования микротопографии, рассмотрим этот вопрос на примере шлифованных поверхностей роликовых направляющих.

На рисунке 2.1 показана микротопография поверхности, включающей обкатанный и не обкатанный участки.



Рис. 2.1 Микротопография участков обкатанной и не обкатанной поверхности шлифованной направляющей

Формально это лишь качественная картина, однако она помогает лучше понять суть процессов формирования и изменения микрорельефов поверхностей и сделать правильные выводы по результатам исследований.

Сравним поверхностные и профильные критерии шероховатости, полученные для одних и тех же участков поверхностей роликовых направляющих (табл. 2.1).

В табл. 2.1 профильные критерии подставлены среднеарифметическими значениями для трех профилей, снятых на том же участке поверхности, для которого определены поверхностные критерии. Аналогичные результаты получены во всех случаях сравнения профильных и поверхностых критериев шероховатости, что можно продемонстрировать еще одним примером (табл. 2.2).

Таблица 2.1

Участок	Профильные кри-			Поверхностные		
	те	рии, мкм	критерии, мкм			
поверхности	R _a	R_q	R _m	R _a	Rq	R _m
До обкатки	0,167	0,216	1,31	0,17	0,22	1,57
После обкатки	0,143	0,185	1,07	0,15	0,19	1,27

Таблица 2.2

Участок	Профильные кри- терии, мкм			Поверхностные критерии, мкм		
поверхности	R _a	R _q	R _m	R _a	R _q	R _m
До обкатки	0,148	0,187	1,04	0,15	0,19	1,2
После обкатки	0,134	0,174	1,03	0,14	0,17	1,1

Анализ полученных результатов показывает, что различия таких среднестатистических параметров шероховатости, как R_a и R_q для профиля и для поверхности пренебрежимо малы. Значения экстремальных критериев, например R_m , для профилей на 5 – 20 % меньше, чем для поверхностей.

В настоящее время для получения поверхностных критериев требуется значительно больше времени, чем для получения профильных критериев. Кроме того, следует учитывать высокую стоимость аппаратуры. При выполнении исследовательских работ затраты на получение микротопографии и поверхностных критериев могут быть оправданы, однако в производственных условиях это недопустимо.

Сравним амплитудные и энергетические спектры поверхностей до испытания (рис. 2.2) и после них (рис. 2.3) и функции плотности распределения ординат этих поверхностей (рис. 2.4). Под воздействием роликов существенно изменяется лишь высокочастотная часть спектра, т.е. шероховатость. Низкочастотная часть спектра – волнистость и близкие к ней отклонения – остаются практически неизменными, следовательно, коэффициент трения качения изменяется в процессе испытаний направляющих под влиянием шероховатости.



Рис. 2.2 Амплитудный (а) и энергетический (б) спектры исходной поверхности



Рис. 2.3 Амплитудный (а) и энергетический (б) спектры обкатанной поверхности

Сравнение нормированных функций плотности распределения ординат обкатанной и исходной поверхностей в данном случае показывает незначительное изменение микрорельефа, т.е. качественные изменения под действием роликов.



Рис. 2.4 Функции плотности распределения ординат исходной (а) и обкатанной (б) поверхностей

2.2. Особенности оценки микрогеометрии продольно шлифованных поверхностей

Шлифование является одним из важнейших видов чистовой обработки, поэтому правильная оценка шероховатости шлифованных поверхностей имеет большое практическое значение [9, 38].

Из-за конструктивных особенностей или производственных обстоятельств многие поверхности деталей (в том числе и исследуемых направляющих) обрабатывают при отсутствии поперечных подач, т.е. продольным шлифованием. В качестве критериев оценки следующие микрогеометрии используют параметры: среднеарифметическое отклонение R_a профиля; среднеквадратичное отклонение R_a профиля когорое имеет делесообразнее такую же информативность, как R_a, н статистических сследований применять для среднеквадратичное отклонение R_a профиля.

Профили поверхностей были получены с помощью профилографа-профилометра «Talysurf 10».

Проблема, возникающая при оценке шероховатостей указанных выше поверхностей, заключается в том, что результаты, получающиеся при продольном и поперечном ощупывании поверхностей, в значительной степени отличются друг от друга.

На рис. 2.5 показаны профили тонко шлифованной поверхности (R_a ≈ 0,2 мкм) в продольном (а) и поперечном (б) направлениях. Большое различие этих профилей очевидно.

В таблице 2.3 представлены средние значения и рассеяние (в %) параметров R_q и R_m шероховатости большого количества продольных и поперечных профилей продольно шлифованных поверхностей.

Таблица 2.3

Профиль	К	ритерий и е	его рассея	ние
	R _q		R	m
	мкм	%	мкм	%
Продольный	0,118	33,05	0,464	29,74
Поперечный	0,214	18,22	1,263	19,79


Рис. 2.5 Продольный (а) и поперечный (б) профили шлифованной поверхности

Приведенные данные свидетельствуют не только о большом различии критериев для продольных и поперечных профилей, но и о гораздо больших рассеяниях первых, что характеризует недостаточную их достоверность. Поэтому нецелесообразно снимать профили поверхности в направлении подач при продольном шлифовании. На рис. 2.6 показан продольный профиль достаточно большой длины (5 мм). Он свидетельствует о неста иопарности профиля на различных участках. Однако оптинеская оценка (с помощью микроскопа) такой поверхности показывает несомненную регулярность ее в продольном направлении. Это доказывает, что нерегулярность (нестационарность) профиля является следствием ощупывания поверхности.

При ощупывании тонко шлифованной поверхности вдоль направления подачи игла датчика соскальзывает с узких острых выступов и идет вдоль впадин - рисок, оставленных абразивными зернами на этой прерхности. Аналогичное явление наблюдается и при ощупывании поверхности в направлениях, мало отличающихся от продольной подачи. В таких случаях игла датчика идет, соскальзывая в продольную впадину, пока поперечная сила не перебросит ее через выступ в соседнюю впадину, где все повторится. Поэтому продольные профили рассматриваемых поверхностей не содержат информации, достаточной для достоверной оценки их шероховатости, так как игла датчика ощупывает, в основном, впадины и подножья выступов.



Рис. 2.6 Продольный профиль чисто шлифованной поверхности

Критерии, вычисленные для продольных профилей, значительно меньше соответствующих критериев, вычисленных для поперечных профилей. Причина этого изложена выше.

У грубых продольно шлифованных поверхностей ширина впадин и выступов достаточно велика, чтобы игла датчика при снятии продольных профилей не срывалась.

При ощупывании таких поверхностей (рис. 2.7) получается чисто регулярный характер профилей. Это объясняется тем, что игла датчика идет по следу зерна шлифовального круга, наиболее сильно выступающего в данной секущей плоскости. Но, так как в других сечениях круга абразивные зерна выступают на разную величину, параллельные продольные профили имеют различную глубину и один профиль не может дать полной информации о шероховатости поверхности. Это означает также, что продольные профили являются лишь функциями радпуса вращения одного абразивного зерна и глубины шифрвания. Таким образом, параметры шероховатости грубых продольно шлифованных поверхностей, вычисленные для поперечных профилей, больше, чем для продольных (табл. 2.4).

T C	~ 4
	ו/ נ ב
гаолиц	a 2.4

Параметр шерохо-	Профиль		
ватости, мкм	Продольный	Поперечный	
R _a	0,525	1,54	
R _m	2,02	9,26	



Рис. 2.7 Продольный профиль грубо шлифованной поверхности

Продольное шлифование поверхности не следует ощупывать при оценке их шероховатости в направлении подачи, так как это приводит к ошибочным выводам. Снятие профилей в поперечном направлении дает более надежные результаты. Если по каким-либо причинам невозможно снять поперечные профили, их рекомендуется снимать под углом к направлению подачи. Так возникает необходимость определения минимального допускаемого значения этого угла.

В таблицах 2.5 и 2.6 приведены параметры шероховатости, вычисленные для профилей двух тонко шлифованных поверхностей при изменении направления профиля от продольного до поперечного. С повышением угла наклона профилей по отношению к направлению подачи параметры шероховатости увеличиваются. Однако высотные параметры можно считать практически постоянными для углов, больших 20°.

При оценке шероховатости продольно шлифованных поверхностей базовую длину следует измерять по поперечному профилю. Если ощупывание поверхности производится под определенным углом наклона к направлению подачи, то базовую длину следует разделить на синус этого угла.

Таблица 2.5

Угол профи-	Критерии и их рассеяние			
ля к направ-		R _q	R _n	n
лению пода-	мкм	%	мкм	%
чи, град				
0	0,148	22,39	0,558	25,25
1	0,172	15,50	0,664	12,79
2	0,168	13,29	0,691	14,82
3	0,191	13,55	0,847	13,77
4	0,175	11,13	0,813	21,26
5	0,199	12,45	0,809	4,97
6	0,193	5,98	0,908	5,15
7	0,187	12,35	0,802	10,01
8	0,204	5,54	0,896	1,82
9	0,218	3,79	1,009	5,07
10	0,189	4,49	0,893	4,92
15	0,20	1,89	0,998	4,37
20	0,219	1,49	1,127	2,54
30	0,209	3,17	1,126	1,51
40	0,223	4,56	1,255	4,06
60	0,224	1,84	1,369	7,42
80	0,246	3,19	1,513	6,4
90	0,242	5,42	1,54	8,42

Таким образом, оценка шероховатости продольно шлифованных поверхностей по профилям, снятым параллельно направлению подачи, нецелесообразна, Наиболее достоверные результаты получаются для поперечных профилей, однако, если это невозможно, то допустимо снимать их под углом не менее 20° к направлению подачи.

Таблица 2.6

Угол профи-	Критерии и их рассеяние			•
ля к направ-	R _q		R _m	
лению пода-	мкм	%	мкм	%
чи, град				
0	0,391	3,57	1,534	1,86
1	0,319	10,59	1,625	12,80
2	0,364	2,02	1,552	4,19
3	0,508	0,28	2,139	2,94
4	0,410	3,08	1,926	4,44
5	0,355	5,40	1,863	4,34
6	0,399	0,25	1,892	0,53
7	0,413	1,94	1,896	1,64
8	0,434	2,62	2,140	4,07
9	0,453	0,58	2,304	1,14
10	0,429	2,99	2,234	7,75
15	0,413	8,50	2,365	12,37
20	0,413	7,94	2,485	5,69
30	0,427	1,55	2,592	5,24
40	0,401	6,21	2,368	7,38
50	0,394	1,22	2,495	0,59
60	0,425	2,42	2,788	3,05
70	0,397	5,87	2,537	10,28
80	0,421	4,37	2,738	9,28
90	0,401	4,09	4,463	3,45

2.3. Влияние исходной шероховатости поверхности на коэффициент трения качения и долговечность роликовых направляющих

В последние годы роликовые направляющие (рис. 2.8) получили широкое распространение в станкостроении и приборостроении. Обеспечивая достаточно высокую точность и легкость относительного перемещения элементов станков и приборов, они требуют небольших затрат на изготовление и способствуют унификации поступательно перемещающихся элементов типа суппортов.



Рис. 2.8 Роликовые направляющие

В силу особенностей конструкции для финишной обработки направляющих целесообразнее использовать плоское шлифование.

Основной проблемой в этой области является повышение долговечности направляющих, которые выходят из строя из-за усталостного разрушения рабочих поверхностей.

Понятно, что долговечность зависит от большого количества факторов. Для их изучения необходимо провести комплексные исследования, которые были выполнены в цюрихском институте станкостроения и технологии по заказу фирмы «Schneeberger». Здесь рассмотрена лишь часть исследований, связанных с определением влияния исходной шероховатости на коэффициент трения качения и долговечность направляющих.

Для проведения этих исследований было изготовлено четыре комплекта направляющих, состоящих из восьми направляющих с различной исходной шероховатостью. Материал направляющих, их термообработка, определяющая механические свойства деталей, оставались неизменными.

Испытания проводили на специальной установке, оснащенной самой современной измерительной и регистрирующей аппаратурой, которая, в частности, позволяла фиксировать малейшие колебания силы трения и момент появления усталостных трещин на рабочих поверхностях направляющих.

Эксперименты проводили по специальной программе ускоренных испытаний с обеспечением полной идентичности условий для всех направляющих.

В первый комплект входили серийные направляющие со средними значениями параметра $R_q = 0,26$ мкм, во второй комплект - тщательно отшлифованные направляющие; $R_q = 0,17$ мкм, в третий комплект - более грубо обработанные направляющие; $R_q = 1,13$ мкм, в четвертый комплект - грубо шлифованные направляющие с последующей притиркой, в результате которой получены так называемые «платообразные» поверхности. $R_q = 0,59$ мкм.

В процессе испытаний усилие равномерно распределялось на 14 роликов. Направляющие совершали возвратнопоступательное движение, а по их рабочим поверхностям перекатывались ролики. С помощью измерительной и регистрирующей аппаратуры устанавливали требуемые режимы испытаний и фиксировали их результаты.

На рис. 2.9 показана диаграмма измерений сил трения при усилии 400 Н на ролик в период приработки направляющих 3-го комплекта, а на рис. 2.10 – диаграмма сил трения в процессе установившихся испытаний тех же направляющих при усилии 4000 Н на ролик.

В виде таких диаграмм силу трения фиксировали непрерывно в процессе всех испытаний, и при малейших нарушениях поверхности направляющих в момент появления



Рис. 2.9 Диаграмма сил трения при приработке направляющих 3-го комплекта



Рис. 2.10 Диаграмма сил трения при установившемся режиме испытаний направляющих 3-го комплекта

усталостной трещины высокочувствительными датчиками регистрировали незначительное увеличение сил трения (рис. 2.11).



Рис. 2.11 Диаграмма сил трения с регистрацией появления первой усталостной трещины при испытании направляющих 4-го комплекта

До испытаний на каждой рабочей поверхности направляющей было снято не менее трех профилей, для которых с помощью компьютера определяли параметрические (табл. 2.7-2.11) и непараметрические (рис. 2.12-2.14) критерии.

Для анализа и оценки микрогеометрии поверхности, получающейся после испытаний, на каждом пятне, оставленном роликами, снимали по три профиля, для которых определяли те же критерии, что и для исходных поверхностей направляющих.

Направляюще 1-го и 2-го комплектов имели незначительный разброс параметров шероховатости как исходных, так и отработанных поверхностей, поэтому в табл. 2.7-2.9 приведены лишь некоторые результаты расчета различных критериев. Для направляющих 3-го и 4-го комплектов приведены более подробные сведения (табл. 2.10-2.11), так как разброс критериев микрогеометрии их поверхностей более сушественный.

Во всех таблицах первая цифра в обозначении профиля означает номер комплекта направляющих, вторая цифра номер направляющей в комплекте, третья – номер рабочей поверхности направляющей; буква Н обозначает необкатанную поверхность, О - обкатанную; последняя, четвертая цифра означает номер пятна, оставленного роликами на рабочей поверхности направляющей (см. рис. 2.8). В обозначениях профилей необкатанных поверхностей этой цифры нет.

Пример обозначения профиля третьего комплекта, четвертой направляющей, первого пятна, оставленного роликом на второй рабочей поверхности направляющей: 3-4-2-0-1.

			Таблица 2.7
Критерий	R _a , мкм	R _q , мкм	R _m , мкм
1-1-1-0-1	0,139	0,176	0,995
1-1-1-0-2	0,135	0,175	1,016
1-1-1-O-H	0,213	0,27	1,512
1-1-1-0-3	0,144	0,189	1,179
1-1-2-0-1	0,137	0,177	0,961
1-1-2-0-2	0,18	0,225	1,208
1-1-2-0-3	0,174	0,224	1,217
1-1-2-0-4	0,143	0,187	1,11

В табл. 2.7-2.11 приведены арифметические значения критериев для трех профилей, а в табл. 2.8-2.11 и отклонения критериев от их средних значений. Все параметрические критерии профилей поверхности до испытаний и после испытаний имеют одинаковый разброс.

			таолица 2.0
Критерий	R _a , мкм ± ∆	R _q , мкм ± ∆	R _m , мкм ±
	R _a	R _q	ΔR_m
1-2-1-H	0,211	0,268	1,548
	0,011	0,012	0,059
1-2-2-H	0,212	0,269	1,54
	0,013	0,015	0,069

таоліца 210

- -

1-1-1-2-1-7	0,144	0,185	1,06
	0,015	0,017	0,091
1-3-1-H	0,199	0,253	1,486
	0,003	0,002	0,069
1-3-2-H	0,192	0,242	1,358
	0,01	0,011	0,12
1-3-1-0-1	0,143	0,183	1,009
	0,005	0,007	0,005
1-3-1-0-2	0,146	0,186	1,019
	0,006	0,007	0,058
1-3-2-0-1	0,134	0,178	1,059
	0,006	0,006	0,151
1-3-2-0-2	0,149	0,189	1,067
	0,011	0,015	0,127

T-C----- 2.0

			таолица 2.5
Критерий	R _a , мкм ± ∆	R _q , мкм ± ∆	R _m , мкм ±
	R _a	R _q	ΔR_m
1	2	3	4
2-1-1-2-H	0,132	0,169	1,014
	0,009	0,011	0,083
2-1-1-0-1	0,106	0,136	0,795
	0,004	0,005	0,021
1	2	3	4
2-1-2-0-1-4	0,103	0,14	0,78
	0,009	0,02	0,089
2-2-1-2-H	0,145	0,185	1,065
	0,009	0,01	0,042
2-2-1-0-1	0,113	0,145	0,824
	0,011	0,013	0,023
2-2-1-0-2	0,096	0,124	0,69
	0,002	0,00	0,039
2-2-1-0-3	0,134	0,174	1,029
	0,001	0,007	0,108
2-2-2-0-1	0,108	0,136	0,753
	0,003	0,005	0,043
2-2-2-0-2	0,129	0,167	0,88
	0,004	0,004	0,007
2-2-2-0-3	0,108	0,139	0,819
	0,009	0,011	0,072

3-1-2-0-1	0,619	0,746	3,411
	0,04	0,055	0,44
3-2-1-0-1	0,794	0,95	4,068
	0,152	0,188	0,695
3-2-1-0-2	0,974	1,163	4,933
	0,176	0,191	0,572
3-2-2-0-1	0,46	0,588	2,887
	0,053	0,079	0,547
3-2-2-0-2	0,557	0,706	3,441
	0,098	0,13	0,508
3-3-1-0-1	0,451	0,573	2,838
	0,006	0,015	0,086
3-3-2-0-1	0,891	1,061	4,661
	0,134	0,154	0,401
3-3-2-0-2	0,895	1,088	4,784
	0,105	0,118	0,327
3-4-1-0-1	0,662	0,809	3,848
	0,072	0,075	0,465
1	2	3	4
3-4-2-0-2	0,637	0,784	3,649
	0,105	0,123	0,42
3-5-1-0-1	0,686	0,83	3,628
	0,057	0,048	0,14
3-5-1-0-2	0,651	0,774	3,442
	0,086	0,083	1,191
3-5-2-0-1	0,64	0,779	3,499
	0,04	0,05	0,247
3-6-1-0-1	0,601	0,759	3,512
	0,025	0,024	0,619
3-6-1-0-2	0,618	0,789	3,868
	0,013	0,032	0,36
3-6-2-0-1	0,543	0,681	3,276
	0,012	0,023	0,194
3-6-2-0-2	0,457	0,565	2,789
	0,041	0,042	0,113
3-7-1-0-1	0,505	0,624	3,045
	0,018	0,033	0,344
3-7-2-0-1	0,476	0,596	2,971
	0,024	0,037	0,376

2-2-2-0-4	0,101	0,133	0,765
	0,003	0,008	0,091

Таблица 2.10

			таолица 2.1
Критерий	R _a , мкм ± ∆	R _q , мкм ± ∆	R _m , мкм ±
	R _a	R _q	ΔR_{m}
1	2	3	4
3-1-2-H	0,919	1,099	4,794
	0,1	0,102	0,3
3-2-1-H	1,232	1,473	6,261
	0,264	0,299	1,068
3-2-2-H	0,701	0,867	4,331
	0,018	0,024	0,185
3-3-1-H	1,013	1,27	6,018
	0,305	0,387	1,802
3-3-2-H	1,311	1,577	6,67
	0,141	0,157	0,383
3-4-1-H	0,917	1,103	5,06
	0,102	0,122	0,635
3-4-2-H	1,037	1,277	5,961
	0,277	0,347	1,69
1	2	3	4
3-5-2-H	1,036	1,242	5,24
	0,158	0,177	0,55
3-6-1-H	0,848	1,053	5,263
	0,026	0,027	0,145
3-6-2-H	0,807	0,998	4,657
	0,095	0,123	0,513
3-7-1-H	0,723	0,895	4,558
	0,053	0,064	0,037
3-7-2-H	0,673	0,833	3,962
	0,009	0,007	0,051
3-8-1-H	0,888	1,09	4,901
	0,085	0,072	0,174
3-8-2-H	1,069	1,307	5,594
	0,097	0,106	0,447
3-1-1-0-1	0,585	0,732	3,524
	0,067	0,077	0,228
3-1-1-0-2	0,588	0,739	3,572
	0,079	0,083	0,266

3-7-2-0-2	0,506	0,638	3,087
	0,026	0,028	0,142
3-8-1-0-2	0,575	0,71	3,29
	0,06	0,071	0,266
3-8-2-0-1	0,772	0,942	4,014
	0,113	0,123	0,285
3-8-2-0-2	0,759	0,914	3,769
	0,064	0,087	0,279

Таблица 2.11

Критерий	R _a , мкм ± ∆	R_q , мкм ± Δ	R _m , мкм
	R _a	R _a	$\pm \Delta R_m$
1	2	3	4
4-1-2-H	0,347	0,445	2,369
	0,014	0,017	0,120
4-2-1-H	0,486	0,650	3,303
	0,027	0,031	0,312
4-2-2-H	0,430	0,539	2,773
	0,043	0,061	0,405
4-3-2-H	0,350	0,478	2,662
	0,016	0,027	0,135
4-4-1-H	0,492	0,685	3,434
	0,043	0,054	0,095
4-4-2-H	0,303	0,399	2,194
	0,010	0,016	0,028
4-5-2-H	0,443	0,606	3,165
	0,075	0,106	0,412
4-6-1-H	0,676	0,941	4,354
	0,048	0,052	0,482
4-6-2-H	0,302	0,406	2,140
	0,011	0,006	0,126
4-7-2-H	0,429	0,574	3,013
	0,007	0,009	0,083
4-8-2-H	0,456	0,605	3,180
	0,114	0,130	0,435
4-1-1-0-1	0,420	0,604	2,928
	0,060	0,095	0,447
4-1-2-0-1	0,234	0,313	1,802
	0,010	0,013	0,013
4-1-2-0-2	0,226	0,229	1,728

	0,010	0,014	0,069
4-2-1-0-1	0,431	0,598	3,229
	0,045	0,079	0,399
4-2-1-0-2	0,407	0,575	2,944
	0,044	0,080	0,383
4-2-2-0-2	0,305	0,404	2,224
	0,004	0,012	0,165
1	2	3	4
4-4-1-0-2	0,406	0,582	3,085
	0,039	0,047	0,510
4-4-2-0-2	0,270	0,381	2,351
	0,018	0,043	0,461
4-5-1-0-1	0,444	0,646	3,409
	0,035	0,047	0,300
4-5-2-0-1	0,388	0,527	2,724
	0,036	0,051	0,216
4-6-1-0-2	0,503	0,706	3,575
	0,033	0,063	0,377
4-6-2-0-1	0,342	0,482	2,492
	0,056	0,085	0,485
4-6-2-0-2	0,392	0,548	2,891
	0,043	0,067	0,354
4-7-2-0-2	0,316	0,413	2,243
	0,013	0,010	0,145
4-8-1-0-2	0,485	0,687	3,298
	0,065	0,093	0,303
4-8-2-0-1	0,361	0,485	2,602
	0,141	0,176	0,813
4-8-2-0-2	0,341	0,465	2,524
	0,059	0,077	0,474

Данные табл. 2.12 свидетельствуют о том, что после испытаний критерии шероховатости изменяются примерно одинаково, однако для направляющих четвертого комплекта эти изменения заметно меньше.

Анализ полученных результатов показывает, что микрогеометрия поверхностей перед усталостным разрушением определяется ее исходным состоянием и в такой же степени различна, как и до испытаний, т.е. к какому-либо «критическому», одинаковому для всех разрушающихся поверхностей состоянию не приходит.

Характер микрогеометрии поверхности в процессе ее взаимодействия с роликом до самого разрушения остается практически неизменным. Это позволяют установить только непараметрические критерии (функции распределения и плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона

Критерий че	(среднее зна- ение)	R _a , мкм	R _q , мкм	R _m , мкм
1-ый ком- плект	до испыта- ний	0,203	0,258	1,483
	после испы- таний	0,143	0,184	1,043
	изменение в %	70,4	71,4	70,3
2-ой ком- плект	до испыта- ний	0,138	0,177	1,04
	после испы- таний	0,109	0,142	0,803
	изменение в %	79,2	80,5	77,2
3-ий ком- плект	до испыта- ний	0,927	1,132	5,17
	после испы- таний	0,628	0,772	3,56
	изменение в %	67,7	68,2	68,9
4-ый ком- плект	до испыта- ний	0,437	0,592	3,02
	после испы- таний	0,359	0,499	2,65
	изменение в %	82,1	84,3	87,6

Таблица 2.12

безразмерных профилей) (рис. 2.12). Целесообразность использования безразмерных профилей и их непараметрических критериев изложена в работе [6].



Рис. 2.12 Профили (J), снятые с поверхности до испытаний и после испытаний, а также функции плотности распределения ординат (O_n) и тангенсов углов наклона (N_n) и функции распределения ординат (O_{wn}) и тангенсов углов (N_{wn}) соответствующих безразмерных профилей

На рис. 2.13 и 2.14 показаны непараметрические критерии профилей поверхностей направляющих всех четырех комплектов до испытаний и после испытаний. Эти информативные критерии подтверждают, что микрогеометрия поверхности перед разрушением у разных направляющих различна и зависит от ее исходного состояния.



Рис. 2.13 Графики функции плотности распределения (а, б) и распределения (в, г) ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей направляющих четырех комплектов до испытаний



Рис. 2.14 Графики функции плотности распределения (а, б) и распределения (в, г) ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей направляющих четырех комплектов после испытаний

Результаты экспериментальных исследований (рис. 2.12-2.14) позволяют установить целесообразные допустимые очертания непараметричееких критериев с учетом экономических соображений и конкретных требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам направляющих, зависящим от шероховатости их поверхности.

Средние значения коэффициентов сопротивления качению для трех комплектов направляющих при различных нагрузках на ролики и средняя долговечность D показаны в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Комплект		К*10³ при нагрузке на ролик, Н				D		
направ-	200	400	600	800	1000	3000	4300	
ляющих	200	400	000	000	1000	5000	4300	цикло
1-й	0,110	0,080	0,103	0,100	0,120	0,650	0,660	13786
3-й	0,100	0,100	0,140	0,134	0,210	0,950	1,950	20164
4-й	0,050	0,060	0,140	0,200	0,210	1,10	1,600	10690

Данные для 2-го комплекта направляющих не приведены, так как они мало отличаются от результатов испытаний направляющих 1-го комплекта. Это может быть следствием того, что абсолютные значения разности параметров шероховатости направляющих этих двух комплектов малы.

Трудоемкость изготовления направляющих 2-го комплекта больше, чем направляющих 1-го и 3-го комплектов. Получение поверхностей с «платообразным» профилем (4й комплект) также требует дополнительных затрат. Однако функциональные свойства направляющих (долговечность) показывают нецелесообразность этих затрат. Более того, направляющие 3-го комплекта выдержали большее количество циклов нагружений до усталостного разрушения поверхности.

В реальных условиях эксплуатации исследованных направляющих нагрузка на один ролик не превышает 1000 H, поэтому влияние исходной шероховатости в рассмотренных пределах на коэффициент трения не столь значительно, как при больших нагрузках. Однако расширять пределы исходной шероховатости рабочих поверхностей направляющих нецелесообразно, так как получение поверхностей с меньшими параметрами шероховатости, связано с большими затратами, при этом долговечность увеличивается незначительно. Однако при грубой обработке трудно обеспечить высокую точность размеров.

Заметим, что в 1-й комплект входят выпускаемые направляющие и, как показали исследования, можно снизить стоимость их изготовления при сохранении и даже увеличении их долговечности.

Таким образом, учитывая ранее изложенные условия экспериментов, можно утверждать, что исходная микрогеометрия рабочих поверхностей роликовых направляющих влияет не только на коэффициент трения, но и на их долговечность.

Проведение аналогичных исследований, например, для наиболее важных функциональных деталей выпускаемого изделия, вполне доступно для многих промышленных предприятий. Это дает возможность использовать самые информативные критерии для оценки микрогеометрии поверхностей, следовательно, надежнее обеспечивать ее функциональные свойства, зависящие от микрогеометрии, надежно и просто контролировать обработанные поверхности [10, 12].

2.4. Влияние исходной шероховатости поверхности на приработку зубчатых колес

В различных зубчатых сопряжениях, в зависимости от их назначения, первостепенное значение могут иметь какоелибо одно или несколько функциональных свойств. Во многих случаях, ввиду особенностей производства и эксплуатации зубчатых колес, приходится предварительно производить так называемую приработку.

В силу большого практического значения данной операции проведено много исследований, в том числе и по определению влияния микрогеометрии рабочих поверхностей зубьев на различные эксплуатационные свойства колес.

В данном разделе для оценки изменений шероховатости поверхности зубьев в процессе их приработки использованы и некоторые описанные выше новые критерии. Установлено, что в процессе приработки и эксплуатации шероховатость поверхностей трения не стремится к так называемой равновесной шероховатости [11]. По заказу фирмы «Oerlikon-Bürle» были исследованы несколько комплектов зубчатых колес разнообразной формы и размеров, полученных фрезерованием.

В силу нестационарности микрорельефа фрезерованных поверхностей и большого разброса параметров исходной шероховатости определенный интерес представляло исследование микрогеометрии приработанных поверхностей.

О нестабильности параметров исходной шероховатости можно судить по табл. 2.14, где приведены результаты расчета, выполненного для одного зубчатого колеса. При сравнении исходной шероховатости различных зубчатых колес разброс параметров был значительно большим.

		Таблица 2.14
Параметр шерохо-	Среднее значе-	Рассеяние, %
ватости	ние	
R _a , мкм	2,38	15,8
R _a , мкм	3,33	27,8
R _m , мкм	14,21	32,1

Рассмотрим параметры шероховатости семи приработанных зубчатых колес (см. табл. 2.15). Первые шесть колес получены фрезерованием, седьмое – после фрезерования отшлифовано.

· ·						Табли	ца 2.15
Крите-		№ колеса					
рий	1	2	3	4	5	6	7
R _a , мкм	1,22	0,96	1,23	0,97	1,1	1,22	0,22
R _a , мкм	1,55	1,2	1,53	1,24	1,4	1,54	0,37
R _m , мкм	6,93	5,22	6,73	5,24	6,43	7,37	1,85

По средним значениям параметров R_a, R_q, R_m можно предположить, что для колес, обработанных одним способом, существует равновесная шероховатость. Однако при детальном рассмотрении результатов эксперимента становится очевидной несостоятельность такого предположения. Рассеяние параметров шероховатости приработанных поверхностей даже для одного колеса велико (табл. 2.16).

		Таблица 2.16
Параметр шерохо-	Среднее значе-	Рассеяние, %
ватости	ние	
R _a , мкм	0,87	19,5
R _q , мкм	1,13	19,4
R _m , мкм	5,80	28,2

В табл. 2.17 приведены средние значения параметров и их рассеяние для трех приработанных зубчатых колес одинакового размера. Согласно данным табл. 2.16 и 2.17, рассеяние параметров шероховатости приработанных поверхностей зубчатых колес так же велико, как и неприработанных.

Таблица 2.17

		таолица 2.17
Параметр шерохо-	Среднее значе-	Рассеяние, %
ватости	ние	
R _a , мкм	1,26	20,9
R _a , мкм	1,70	30,8
R _m , мкм	7,56	22,9

В данном случае для каждого из многих сотен профилей, наряду с параметрическими критериями, определяли и непараметрические. Сравнение функций распределения и плотности распределения ординат и углов наклона профилей различных приработанных поверхностей зубьев показывает их существенное различие даже для одного колеса и, следовательно, отсутствие равновесной шероховатости для данного вида эксплуатации поверхностей.

Анализ непараметрических критериев, в частности функций распределения и плотности распределения ординат безразмерных профилей поверхностей до приработки и после нее позволяет сделать вывод, что шероховатость приработанных поверхностей зубьев определяется в основном исходной шероховатостью (рис. 2.15). Однако, при большом износе характер приработанной поверхности может существенно измениться по сравнению с исходной (рис. 2.16).



Рис. 2.15 Профили (J) и непараметрические критерии до приработки (1) поверхности зуба и после нее (2)

Эти рисунки также наглядно демонстрируют изменения микрорельефа поверхностей зубьев в результате приработки и возможности использования шаблонов для контроля шероховатости поверхностей.

На рис. 2.17 показана микротопография участков исходной и приработанной поверхностей зуба, иллюстрирующая изменения шероховатости в результате приработки. Всплески на исходной поверхности - результат микроповреждений поверхностей слепка. Из этого рисунка очевидно, что после приработки зубчатого колеса сохраняются основы исходной шероховатости поверхности.



Рис. 2.16 Профили (J) и непараметрические критерии до приработки (1) поверхности зуба при большом износе и после нее (2)



Рис. 2.17 Микротопография поверхности зуба, включающая приработанный и неприработанный участки

2.5. Исследование изменения микрогеометрии поверхностей функциональных деталей судовых дизелей в процессе их приработки и эксплуатации

Непараметрический подход к оценке и контролю микрогеометрии был опробован на изделиях разнообразного назначения. Ниже приводятся исследования динамики изменения микрогеометрии в парах трения судовых дизелей.

2.5.1. Методика исследования

Недостаточные надежность работы и ресурс судовых дизелей требуют более глубокого изучения этих явлений и совершенствования методов исследований.

Одной из важнейших задач является повышение износостойкости функциональных деталей дизелей. В общем случае она решается путем улучшения физико-химических свойств материалов деталей, повышения точности их изготовления и сборки, совершенствования системы смазывания и состава смазочных материалов, а также созданием оптимального микрорельефа трущихся поверхностей.

В настоящее время оптимизация микрогеометрии рабочих поверхностей деталей – наиболее экономичный и один из самых эффективных резервов повышения надежности и ресурса судовых дизелей. Для этого, прежде всего, необходимо исследовать изменения микрорельефа поверхностей деталей в процессе приработки и эксплуатации дизелей, создать и отработать методику достоверной оценки этих изменений, а также метрологически обеспечить как проведение исследований, так и надежный и удобный контроль мирогеометрии в производственных условиях.

Здесь изложены результаты исследований, связанных с изменением микрогеометрии поверхностей функциональных деталей судовых дизелей в реальных условиях работы, позволяющих оптимизировать исходный микрорельеф рабочих поверхностей для обеспечения конкретного эксплуатационного свойства.

Решение поставленной задачи производится с учетом результатов ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований. Важной их особенностью является использование жестких слепков из техновита, позволивших впервые достоверно, с помощью наиболее информативных критериев определить изменение мирогеометриии поверхностей ряда функциональных деталей дизелей в процессе их приработки и эксплуатации.

Этот чрезвычайно важный с теоретической и практической точки зрения процесс изменения микрорельефа многих важных рабочих поверхностей был недоступен для исследования, так как нежесткие слепки позволяют определить лишь малоинформативные критерии R_m и R_z, причем с большими затратами времени, а исследовать непосредственно рабочие поверхности деталей невозможно без разрушения неразборных соединений.

Использование ЭВМ для исследования микрогеометрии поверхностей функциональных деталей судовых дизелей позволило определять значительно больше критериев, чем при ручной обработке профилей, при этом обеспечить высокую достоверность результатов.

Исследованы функциональные детали дизелей типа ЧН16/17 и ЧН18/20, для которых найдены зависимости изменения микрорельефа рабочих поверхностей от их наработки, материала и степени старения смазочного материала [14, 15].

Исследованы поверхности следующих функциональных деталей судовых дизелей М504Б и М401В: гильз цилиндров, головок поршней, втулок шатунов.

Всего снято, обработано на ЭВМ и проанализировано более 250 профилей.

2.5.2. Исследования изменения микрогеометрии поверхностей деталей дизелей

По описанной методике определены критерии оценки микрогеометрии как для новых, так и для отработавших определенное время поверхностей. Эти критерии позволяют установить характер изменения микро- и макрорельефа поверхностей в процессе испытаний дизелей и оценить эти изменения количественно. Для каждого параметрического критерия определены: среднее значение, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, доверительные интервалы с вероятностью 0,95 и 0,98.

Проанализируем результаты исследования по отдельным группам деталей ЦПГ.

Гильзы цилиндров. Приведем результата исследования микрогеометрии пяти гильз дизеля ЧН 16/17 и пяти гильз дизеля ЧН18/20.

Параметрические критерии оценки микрогеометрии поверхностей гильз первого дизеля представлены в табл. 2.18, второго - в табл. 2.19. Значения высотных критериев R_a, R_{max} для гильз, отработавших определенное количество часов, значительно больше, чем для новых гильз.

Время на-	Параметры	Среднее	Дис-	Довери-
работки		значение	персия	тельный
гильзы,				интервал с
часы				вероят-
				ностью
				0,95
0	R _a , мкм	0,25	0,03	0,14-0,35
	R _m , мкм	1,88	1,46	1,12-2,65
119	R _a , мкм	0,59	0,11	0,34-0,85
	R _m , мкм	3,73	3,03	2,39
1667	R _a , мкм	0,59	0,14	0,27-0,9
	R _m , мкм	4,16	1,96	2,99-5,32
4069	R _a , мкм	0,54	0,33	0,3-1,18
	R _m , мкм	4,13	5,4	3,34-6,92
4760	R _a , мкм	0,51	0,12	0,24-0,78
	R _m , мкм	4,33	7,61	2,21

Таблица 2.18

Причем для гильз, отработавших от 119 до 5487 часов, они почти одинаковы, особенно R_a. Если рассматривать только эти критерии, то можно сделать вывод, что в процессе работы устанавливается так называемая равновесная шероховатость поверхности, практически одинаковая для всех гильз. Однако другие, даже параметрические критерии вынуждают поставить под сомнение этот вывод. В первую очередь следует обратить внимание на большие дисперсии и доверительные интервалы всех параметрических критериев, в том числе R_a и R_m. Об отсутствии равновесной шероховатости свидетельствуют большие различия значений других многочисленных критериев, не приводимых здесь с целью сокращения объема публикации. Рассмотрение наиболее информативных непараметрических критериев (рис. 2.18-2.23) однозначно подтверждает отсутствие равновесной шероховатости поверхности исследуемых гильз цилиндров судовых дизелей.

Таблица 2.19

Время на-	Параметры	Сред-	Диспер-	Доверии-
работки,		нее	СИЯ	тельный
часы		значе-		интервал
		ние,		с вероят-
				ностью
				0,95
0	R _a , мкм	0,12	0,7*10 ⁻³	0,1-0,14
	R _m , мкм	1,84	2,8	0,55-3,13
0	R _a , мкм	0,16	0,5*10 ⁻³	0,14-0,18
	R _m , мкм	2,8	5,3	1,02-4,57
5	R _a , мкм	0,15	0,002	0,12-0,19
	R _m , мкм	1,61	1,57	0,65-2,58
1868	R _a , мкм	0,42	0,01	0,33-0,5
	R _m , мкм	6,07	10,4	3,59-0,5
5487	R _a , мкм	0,57	0,04	0,41-0,73
	R _m , мкм	8,35	15,7	5,05-11,6



Рис. 2.18 Область расположения относительных опорных кривых профилей поверхностей новых гильз



Рис. 2.19 Область расположения относительных опорных кривых профилей поверхностей гильз, отработавших различное время



Рис. 2.21 Графики функций плотности распределения ординат профилей поверхностей четырех гильз, отработавших различное время







Рис. 2.22 Графики функций плотности распределения тангенсов углов наклона профилей поверхностей четырех новых гильз



Рис. 2.23 Графики функций плотности распределения тангенсов углов наклона профилей поверхностей четырех гильз, отработавших различное время

В процессе работы дизелей средняя высота микронеровностей рабочих поверхностей рабочих поверхностей гильз увеличилась примерно в 2 раза, а углы наклона профилей – в 3-10 раз и более.

Непараметрические критерии – функции распределения ординат (рис. 2.20) и тангенсов углов наклона (рис. 2.22) профилей и опорные кривые профилей (рис. 2.18) – показывают определенную нестабильность микрорельефа исходных поверхностей, которая увеличивается в процессе работы дизелей (рис. 2.21, 2.23, 2.19).

На рисунках 2.18 и 2.19 штриховыми линиями показаны середины зон рассеивания графиков для отдельных гильз дизелей. Заштрихованы суммарные зоны рассеивания соответствующих графиков. На рис. 2.18 дополнительно введена зона рассеяния кривых для новой гильзы первого дизеля, чтобы подчеркнуть различный характер исходного микрорельефа рабочих поверхностей гильз испытуемых дизелей.

Наиболее существенны различия углов наклона профилей исходного микрорельефа гильз первого и второго дизелей. Это подтверждают плотности распределения ординат (рис. 2.20) и тангенсов углов наклона (рис. 2.22) новых гильз обоих дизелей. Плотности распределения ординат (рис. 2.21) и тангенсов углов наклона (рис. 2.23) профилей отработавших гильз обоих дизелей убедительно свидетельствуют об отсутствии равновесного микрорельефа, который формируется на рабочих поверхностях в процессе эксплуатации.

Поршни. Рассмотрим изменение микрорельефа рабочих поверхностей между первым поршневым кольцом и верхним срезом в новых и отработавших различное время поршнях.

Параметрические критерии оценки микрогеометрии поверхностей поршней первого дизеля представлены в табл. 2.20., а второго – в табл. 2.21.

Значения высотных и итериев R_a , R_m для работавших поршней в среднем примерю в 2 раза выше, чем для новых поршней. Однако в отличие от гильз они изменяются в широких пределах: R_a = от 1,82 до 3,78 мкм и R_m = от 8,8 до 20,1 мкм. Дисперсии и доверительные интервалы этих критериев в основном также значительно большие, чем для гильз.

Остальные параметрические критерии для работавших поршней, не обнаруживают какой-либо закономерности изменения и по абсолютной величине в среднем незначительно отличаются от критериев для новых поршней.

				таолица 2.20
Время на-	Параметры	Среднее	Диспер-	Довери-
работки,		значение	сия	тельный
часы				интервал
				с вероят-
				ностью
				0,95
0	R _a , мкм	1,68	1,15	0,08-4,28
	R _m , мкм	6,88	60,1	1,68-32,1
0	R _a , мкм	1,24	0,3	0,16-2,32
	R _m , мкм	7,18	11,1	0,64-13,7
0	R _a , мкм	1,06	0,19	0,2-1,92
	R _m , мкм	6,18	0,33	5,05-7,3
926	R _a , мкм	1,82	0,31	0,73-2,91
	R _m , мкм	8,85	5,23	4,36-13,3
926	R _a , мкм	3,78	6,21	1,1-8,66

Таблица 2.20

	R _m , мкм	19,1	106	1,1-39,2
926	R _a , мкм	2,7	15,8	1,2-12,4
	R _m , мкм	17,5	357	11,5-62,6
1651	R _a , мкм	2,02	2,2	0,26-5,5
	R _m , мкм	12,2	71	0,8-32,2
1651	R _a , мкм	2,64	23,6	1,7-17,5
	R _m , мкм	12,9	403	2,8-75,9
1651	R _a , мкм	3,78	3,3	0,1-7,02
	R _m , мкм	20,1	65,5	4,2-36

Сравнивая непараметрические критерии оценки микрогеометрии поверхностей четырех новых поршней, видим, что процессы их обработки нестабильны и обнаружить эту нестабильность (см. табл. 2.20 и 2.21) с помощью критериев R_a и R_m невозможно. В качестве примера на рис. 2.24, а показаны лишь наиболее привычные критерии - относительные опорные кривые профилей поверхностей.

				Габлица 2.2
Время на-	Параметры	Среднее	Диспер-	Доверии-
работки,		значение	сия	тельный
часы				интервал
				с вероят-
				ностью
				0,95
0	R _a , мкм	1,2	0,01	1,0-1,4
	R _m , мкм	8,8	11	2,3-15,3
1868	R _a , мкм	2,95	2,94	0,4-6,3
	R _m , мкм	12,6	25,1	2,7-22,74
5497	R _a , мкм	2,59	4,94	1,4-6,6
	R _m , мкм	14,4	159	1,0-39

На основании полученных результатов заводуизготовителю даны рекомендации по ужесточению контроля технологии обработки деталей ЦПГ и усовершенствованию методов контроля.

Как и в случае с гильзами, непараметрические критерии оценки микрогеометрии поверхностей восьми работавших поршней (рис. 2.24, б) имеют большое рассеяние, свиде-

тельствующее об отсутствии равновесного, одинакового микрорельефа.



Рис. 2.24 Области расположение относительных опорных кривых профилей новых (а) поршней и отработавших различное время (б)

Следует подчеркнуть, что непараметрические критерии с большой очевидностью обнаруживают нестационарность исследованных поверхностей и их малейшие изменения в процессе эксплуатации, благодаря значительно большей информативности по сравнению с параметрическими (в том числе стандартизированными) критериями.

Втулки шатунов. Рассмотрим результаты анализа микрогеометрии шести втулок. На каждой запрессованной втулке снимали по три профиля вдоль оси симметрии с расположением по периметру втулки под углом 120⁰ друг относительно друга.

Параметрические критерии оценки микрогеометрии рабочих поверхностей втулок шатунов сведены в табл. 2.22. Среднее значение R_a для работавших втулок примерно в 2 раза больше, чем для новых, значения R_m , в основном, различаются в незначительной степени.

			-	Габлица 2.22
Время на-	Параметры	Среднее	Дис-	Доверии-
работки,		значение	пер-	тельный
часы			СИЯ	интервал с
				вероят-
				ностью
				0,95
0	R _a , мкм	0,77	0,01	0,58-0,96
	R _m , мкм	5,9	1,1	3,8-7,9
0	R _a , мкм	0,77	0,03	0,42-1,11
	R _m , мкм	9,03	4,9	4,7-13,3
0	R _a , мкм	0,52	0,005	0,37-0,66
	R _m , мкм	4,3	2,9	1-7,64
1651	R _a , мкм	1,23	0,36	0,05-2,4
	R _m , мкм	15,6	51,9	1,45-29,7
1868	R _a , мкм	1,36	0,44	0,06-2,66
	R _m , мкм	8,4	4,6	4,15-12,6
5497	R _a , мкм	1,21	0,4	0,03-2,46
	R _m , мкм	7,45	9,9	1,3-13,6

Из всех рассмотренных непараметрических критериев в качестве примера на рис. 2.25 приведены лишь относительные опорные кривые профилей рабочих поверхностей новых и работавших втулок.



Рис. 2.25 Области рассеяния относительных опорных кривых профилей поверхностей новых (а) и отработавших различное время (б) втулок

2.5.3. Изменения микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей деталей ЦПГ в процессе испытаний дизелей

Для оптимизации микрогеометрии рабочих поверхностей деталей ЦПГ судовых дизелей необходимо изучить динамику ее изменения в процессе работы дизеля.

Определенный шаг в этом направлении сделан. Для этой цели применены более информативные (непараметрические) критерии оценки микрогеометрии, обработано большое количество профилей поверхностей с помощью ЭВМ, а также использованы высококачественные жесткие слепки из техновита, без которых динамику изменения микро- и макрорельефа конкретной поверхности, например такой детали ЦПГ, как гильза, в процессе ее работы исследовать невозможно. Этим в большой степени объясняется отсутствие аналогичных исследований в отечественной практике судового дизелестроения.

Как уже отмечалось, в опубликованных до настоящего времени работах утверждается, что в процессе приработки микрорельеф поверхностей трения скольжения независимо от его исходного вида, приходит к определенному, так называемому равновесному состоянию, которое сохраняется до возникновения задиров и интенсивного износа.

Использование более информативных критериев позволило установить (см. раздел 2.5.2), что в парах трения ЦПГ судовых дизелей при их приработке и эксплуатации равновесная шероховатость не возникает.

Рассмотрим самые информативные критерии – функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей новых и отработавших определенное время (от 926 до 5497 ч) деталей ЦПГ двух судовых дизелей.

Анализ показывает, что характер микрорельефа поверхностей в процессе их работы постоянно изменяется. Первоначальный платообразный микрорельеф, постепенно разрушаясь, превращается в островершинный. Острые вершины в процессе работы пары трения изнашиваются, снова превращая микрорельеф поверхности в платообразный.

Указанные процессы повторяются с определенным периодом, который зависит от физико-механических свойств материала, условий работы и исходного микрорельефа и

таким образом характеризует интенсивность изнашивания рабочих поверхностей.

Рассмотренные ранее параметрические критерии (см. рис. 2.18-2.25) согласуются с описанной схемой изменения микрорельефа, и хаотичный характер изменения параметрических критериев, представленных в табл. 2.18-2.22, вполне объясним этой схемой.

Основные результаты:

- 1. Обоснован качественно новый подход к решению проблемы оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей деталей машин и приборов, базирующийся на достоверном и полном ее описании.
- Разработан и исследован непараметрический метод оценки и контроля микрогеометрии поверхностей с использованием геометрических изображений функций распределения и плотности распределения ординат и углов наклона профилей – самых информативных критериев.
- Экспериментально исследовано влияние исходной микрогеометрии и поверхностей роликовых направляющих на их сопротивление усталости и коэффициент трения качения, а также поверхностей зубчатых колес на их приработку.
- 4. На базе разработанных методов исследованы изменения микро- и макрогеометрии поверхностей деталей ЦПГ судовых дизелей в процессе их приработки и испытаний.
- 5. Разработаны методики и выполнены экспериментальные исследования по определению стационарности различных видов обработанных поверхностей и базовых длин их профилей применительно к новым непараметрическим критериям.
- Предложен и проанализирован метод разделения шероховатости, волнистости и отклонений формы поверхностей с использованием амплитудных спектров профилей, который позволяет также исключать погрешности установки деталей при записи профилей поверхности.
- 7. Использование стандартизованных критериев оценки шероховатости поверхностей (особенно наиболее распространенного R_a) в силу недостаточной их информативности во многих случаях не только не позволяет оптимизировать микрогеометрию поверхности, но и явля-

ется причиной ошибочных выводов и рекомендаций при попытках ее оптимизировать.

- 8. Для правильной оценки влияния микрогеометрии реальных поверхностей на конкретные функциональные свойства необходимо обеспечить достаточно полное и практически однозначное ее описание.
- Полное параметрическое описание микрогеометрии реальных поверхностей во многих случаях затруднено изза необходимости использовать для этого большое количество критериев и устанавливать соответственно большое количество взаимосвязей между ними и параметрами режимов резания, а также между эксплуатационными свойствами поверхности.
- 10. Разработана и внедрена установка для определения любых критериев оценки микрогеометрии поверхности с помощью ЭВМ.
- 11. Создана основа для стандартизации новых, более информативных критериев оценки микрогеометрии поверхности.

Литература к части 2

- 1. *Валетов В.А.* Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей. – Труды ЛКИ, 1976, вып. 108, с. 135-140.
- 2. *Валетов В.А.* Определение базовой длины профиля для новых критериев оценки шероховатости поверхности. Труды ЛКИ, 1977, вып. 118, с. 115-119.
- Валетов В.А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности. – В кн.: Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении. Л.: ЛКИ, 1978, с. 62-65.
- 4. *Валетов В.А., Марков А.М.* Использование вольтметра ВК7-10А/1 для записи профиля поверхности на перфоленту. Измерительная техника, 1978, № 11, с.19.
- 5. Валетов В.А. Оценка шероховатости, волнистости и отклонений формы поверхности с помощью ЭВМ. – В кн.: Технология судостроения, судового машиностроения, обработки металлов и сварка. Л.: ЛКИ, 1979, с. 113-116.

- Валетов В.А. Использование безразмерного профиля поверхности для оценки ее шероховатости. – В кн.: Технология судостроения, судового машиностроения, обработки металлов и сварка. Л.: ЛКИ, 1980, с. 133-135.
- Валетов В.А. Оценка шероховатости и волнистости поверхности с помощью ЭВМ. – В кн.: Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин. Киев: Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1980, с. 20-22.
- Валетов В.А. Использование новых критериев для оценки микрогеометрии поверхностей деталей машин. – В кн.: Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин. Киев: Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1980, с. 23-25.
- Валетов В.А. Особенности контроля шероховатости продольно шлифованных поверхностей. – В кн.: Процессы постройки, сварки и монтажа судов. Л.: ЛКИ, 1980, с. 160-166.
- Валетов В.А. Влияние исходной шероховатости поверхностей роликовых направляющих на их усталостную прочность. – В кн.: Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Новосибирск: НТО Машпром, 1982, с. 24-26.
- 11. Валетов В.А. Анализ изменения микрорельефа поверхностей зубьев в процессе приработки зубчатых колес. – В кн.: Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Новосибирск: НТО Машпром, 1982, с. 26-28.
- 12. Валетов В.А. Влияние исходной микрогеометрии на коэффициент сопротивления качению и долговечность роликовых направляющих. – Трение и износ, 1982, том III, № 5, с. 914-918.
- Валетов В.А. Влияние фильтрации профиля на правильность оценки зависимости функциональных свойств поверхности от ее микрогеометрии. В кн.: Вопросы изготовления, сварки и монтажа судостроительных конструкций. Л.: ЛКИ, 1982, с. 144-149.
- 14. Валетов В.А. Использование непараметрических методов для оценки и контроля шероховатости поверхностей деталей двигателей. Двигателестроение, 1983 г.,№5.

- 15. Валетов В.А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндро- поршневой группы судовых дизелей в процессе их работы. Трение и износ, 1983 г.,том4, №6, с.1104-1107.
- 16. Валетов В.А., Васильков Д.В. Печенюк Д.Ю. Эффективность использования международных стандартов при контроле микрогеометрии функциональных поверхностей деталей машин. Межвузовский сборник "Машиностроение и автоматизация производства", выпуск 11,СПб, 1998 Г.,С. 84-88.
- 17. Валетов В.А. Оптимизация микрогеометрии деталей в приборостроении. ЛИТМО, 1990 г., 100 с.
- 18. Валетов В.А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей. Машиностроение и автоматизация производства. Межвузовский сборник № 6,СПб, СЗПИ, 1997 г.,с.118-121.
- 19. Валетов В.А., Иванов С.Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин, приборов и систем. Инструмент и технологии, 2002 г.,с. 164-167.
- 20. Валетов В.А., С.Д. Третьяков. Исследование микрогеометрии поверхностей трения. Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции СПбГИТМО (ТУ), часть 2, 2000, стр. 57-58
- 21. Валетов В.А., С.Д. Третьяков. Исследование закономерностей изменения микрогеометрии поверхностей деталей при трении-скольжении. Научно-технический вестник, СПб, 2001 стр.79-82
- 22. Валетов В.А., С.Ю.Иванов. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем СПб, 2002, стр.164-167
- 23. Валетов В.А., А.В. Терещенко, А.А. Арсютин. Использование среды MATLAB для анализа микрогеометрии поверхностей деталей и приборов. XXXIII научная и учебно-методическая конференция СПбГУИТМО, 3-6 февраля, 2004г.
- 24. Дунин-Барковский И.В. Применение теории вероятностей и спектральной теории неровностей поверхности для расчета допустимых значений геометрических па-

раметров при функциональной взаимозаменяемости. – В кн.: Основы взаимозаменяемости и технические измерения. М.: Машиностроение, 1964, с. 30-67.

- 25. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
- 26. *Крагельский И.В., Рудзит Я.А.* Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости. Приборостроение, 1968, № 3, с. 15-24.
- 27. Рудзит Я.А. Расчет средних значений главных радиусов кривизны вершин микронеровностей. Приборостроение, 1968, вып. 3, с. 3-14.
- 28. Витенберг Ю.Р. Оценка шероховатости поверхности с помощью корреляционных функций. Вестник машиностроения, 1969, № 1, с. 55-58.
- 29. Витенберг Ю.Р. Система характеристик шероховатости поверхности. Вестник машиностроения, 1970, № 11, с. 56-58.
- 30. *Крагельский И.В., Комбалов В.С.* Расчет величины стабильной шероховатости после приработки (упругий контакт). – ДАН СССР, 1970, т. 193, № 3, с. 554-556.
- 31. *Голубев Ю.М., Кошек Л.Н.* О статистических характеристиках шероховатости поверхности деталей машин. – Надежность и контроль качества, 1970, № 9, с. 40-52.
- 32. Дунин-Барковский И.В. Основные направления исследований качества поверхности в машиностроении и приборостроении. – Вестник машиностроения, 1971, № 4, с. 49-55.
- 33. *Рудзит Я.А.* Исследование точности определения некоторых характеристик шероховатости в зависимости от длины трассы изменения. – Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин, 1972, № 1, с. 16-26.
- 34. Рудзит Я.А. О параметрах шероховатости поверхностей, обработанных абразивными инструментами. – В кн.: Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. Л.: СЗПИ, 1974, с. 63-75.
- 35. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975. 344 с.
- 36. Демкин Н.Б., Курова М.С. Распределение выступов и впадин профиля шероховатости поверхности. – Изв. Вузов. Машиностроение, 1975, № 7, с. 58-62.

- 37. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
- 38. *Waletow W., Staufert G.* Beobachtungen beim Rauheitmessen. Technische Rundschau, 1980, № 50/51, s. 16.
- 39. *Waletow W., Staufert G.* Moderne Methoden der Oberflaechenforschung. Technische Rundschau, 1981, № 10, s. 5-7.
- 40. *Valetov W.A., Grabow J.* Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflaechenmikrogeometrie. 41.Internationales wissenschaftliches Kolloquium, 1996, Band 2, S. 622-625.
- 41. Valetov W.A., J.Grabow., S. Tretiakow. Zur experimentiellen Erforshung der Mikrogeometrie von Reibungsobertlaechen. 47 Internationales wissenshaftliches Kolloqium,2002, Tagussband, s.403-404
- 42. *Liu J.Y., Tallian T.E., McCool J.F.* Dependence of Bearing Fatique Life on Film Thickness to Surface Ratio. ASLE Trans. Vol 18, № 2, p. 144-152.
- 43. *Nayak P.R.* Random Process Model of Rough Surfaces. G.Lubr. Tech., Trance. ASME. July 1971, p. 398-407.
- 44. *Sayles R.S.* Advanced Digital Measurement. In: Course Notes of Short Course on Surface Topography in Engineering: Teeside Polytechnic, 1978, p. 74/
- 45. *Sayles R.S., Thomas T.R.* Mapping a Small Area of Surface. – Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1976, Vol. 9, p. 855-861.
- 46. *Sayles R.S., Thomas T.R.* Stiffness of Machine Toll Joints: A Random Process Approach. J.Eng.Ind., Trans. ASME. Feb. 1977, p. 250-256.
- 47. *Thomas T.R., Sayles R.S.* The Application of Measurement of Surface Roughness to Tribological Problems. – In: Int.Mech.Eng. Tribology Convention: University Durham, March 1976.
- 48. Whitehouse D.J., Archard J.F. The Properties of Random Surfaces of Significance in their Contact. In: Proc. Roy. Soc. London: 1970, Ser. A., № 316, p. 97-121.



Автором 1-ой части является доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники Мусалимов Виктор Михайлович. Основные результаты, частично изложенные в монографии, были представлены на Международном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Варшава, Польша,2004г.), Международной конференции по нелинейной динамике (Абердин,Великобритания,2005г.), 9-ом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, Россия, 2006г.).Монография отражает одно из направлений работ кафедры мехатроники. Кафедра ведет подготовку бакалавров и магистров по направлению:200100 «Приборостроение»

Кафедра готовит бакалавров и магистров техники и технологии, ориентированных на научно-исследовательскую и проектноконструкторскую работу по разработке и изготовлению современных приборов для научных исследований и эксплуатации объектов в различных областях техники.

Магистерские программы:

200100.68.15 «Приборы и устройства биомеханики»

200100.68.16 «Методы и средства исследования сопротивления деформированию элементов приборов»

Кафедра осуществляет подготовку инженеров по специальностям:

220401 «Мехатроника»

Кафедра готовит инженеров в области создании и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением их функциональными и технологическими движениями.

Специализации инженеров:

2204016504 «Прецизионные мехатронные устройства»

Идеология мехатроники- это, прежде всего, конструкционная модульность: объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями. Предметом мехатроники являются методы проектирования и компьютерного управления, новые технологические и информационные процессы, обеспечивающие все этапы жизненного цикла качественно новых изделий.

Кафедра осуществляет тесное научное сотрудничество с зарубежными вузами: технический университет Ильменау, Германия; Таллиннский

технический университет, Эстония; институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси, г. Гомель.

Выпускники кафедры Мехатроники имеют широкие возможности трудоустройства в таких организациях, как: ЗАО «Электроприбор», ЗАО «Электромеханика», ЗАО «Электроавтоматика», ООО «ЛОМО», ЗАО «Завод прецизионных станков, ООО «Завод Измерон», НПП «Росспецприбор», ЗАО «Скала», ЗАО «Завод Магнетон», ЗАО «Кировский завод», НТЦ «Редуктор», ОАО «Научные приборы», ЗАО «Светланаоптоэлектроника», ООО «Class Engineering»", ООО « МИНИТЕХ» и других.

Автором 2-ой части является доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения Валетов Вячеслав Алексеевич. Технология приборостроения – это важнейшая и самая передовая область человеческой деятельности. Современный мир немыслим без приборов безграничной номенклатуры функционального назначения. Кафедра технологии приборостроения готовит специалистов, способных создавать и совершенствовать это "чудо" человеческого разума.

"*Технология приборостроения*" базируется на применении высокопроизводительного, автоматизированного оборудования с числовым программным управлением, включая автоматизированные и роботизированные поточные системы, гибкие производственные системы с единой автоматизированной системой управления как оборудованием, так и складскими и другими системами. Разработка и освоение новых технологий открывают новые возможности для всего человечества.

"Системы автоматизированного проектирования технологической подготовки производства" (АСТПП) необходимы для осуществления деятельности любого производства. Системы АСТПП охватывают задачи по автоматизации труда инженеров-технологов по проектированию современных технологических процессов, разработке конструкций приспособлений и оснастки, управлению всем циклом технической подготовки производства и ее организации. Мусалимов Виктор Михайлович,

Валетов Вячеслав Алексеевич

Динамика фрикционного взаимодействия

Монография

В авторской редакции	
Компьютерная верстка:	Е.А.Воронцов, М.С.Петрищев,
	Д.Н.Калитиевский, С.В.Бобцова
Дизайн обложки	П.П.Коваленко
Редакционно-издательский о	тдел СПбГУ ИТМО
Зав.РИО	Н.Ф.Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.	11.99
Тираж 100 экз. заказ № 962	Подписано к печати 5.07.2006
Отпечатано на ризографе	

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

