



*Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебное пособие

Под редакцией проф. Шелкового А. Н.

Том II

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ;
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Рекомендовано
вченою радою НТУ «ХПІ»
протокол № 1 від 29 01 2016 р.

Харьков
НТУ «ХПІ»
2016

ББК 34.4 – 6*3,1

УДК 621.658

Рецензенты: *В.А. Фадеев, д-р техн. наук, проф., главный инженер, государственное предприятие Харьковский машиностроительный завод «ФЭД»;*

А.П. Тарасюк, д-р техн. наук, проф., проректор, Украинская инженерно-педагогическая академия

Авторы: А.В. Беловол, А.А. Ключко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин,
А.Н. Шелковой

И – 52

Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 2: учеб. пособие /под редакцией А.Н. Шелкового // – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 323 с. – На русском языке

ISBN 978-966-593-750-5

В учебном пособии дана историография возникновения и развития имитационного моделирования. Сформулированы основные понятия имитационного моделирования и приведены концепции имитационных моделей для различных машиностроительных производств: от технологических процессов обработки и контроля до организационно-технических и технологических структур производственных систем.

Учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей, а также аспирантов, научных работников и работников промышленности, сфера деятельности которых связана с поиском рациональных технологических и организационно-технических решений в машиностроении.

Ил. 162

Табл. 21

Библиограф. 130 найм.

У навчальному посібнику дано історіографію виникнення і розвитку імітаційного моделювання. Сформульовано основні поняття імітаційного моделювання і наведено концепції імітаційних моделей для різних машинобудівних виробництв: від технологічних процесів обробки і контролю до організаційно-технічних і технологічних структур виробничих систем.

Навчальний посібник призначено для студентів технічних спеціальностей, а також аспірантів, науковців і працівників промисловості, сфера діяльності яких пов'язана з пошуком раціональних технологічних і організаційно-технічних рішень у машинобудуванні.

Іл. 162

Табл. 21

Бібліограф. 130 найм.

There is historiography of origin and development of imitation design in the train aid of дана. The basic concepts of imitation design are set forth and conceptions over of simulation models are brought for different machine-building productions: from the technological processes of treatment and control to the organizationally-technical and technological structures of the productive systems. Examples of creation of simulation models of механосборочных productions and analysis are made, on their basis, productive activity of enterprise.

A train aid is intended for the students of technical специальностей, and similarly graduate students, research workers and workers of industry, the sphere of activity of that is related to the search of rational technological and organizationally-technical decisions in an engineer.

Abb. 162

Tab. 21

Bibliograph 130 ben.

ББК 34.4 - 6*3.1

ISBN 978-966-593-750-5

©Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ	9
6.1. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования	16
6.2. Математическая модель прогнозирования структуры и параметров технологических систем зубообработки крупномодульных зубчатых колес	33
6.2.1. Общие принципы оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес	33
6.2.2. Моделирование припуска при формообразовании параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес	39
6.2.3. Информационное моделирование технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес	49
6.2.4. Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес при помощи системной оптимизации	54
6.3. Моделирование взаимосвязей технологического воздействия при зубообработке и качества зубчатого зацепления крупномодульных колес	61
6.3.1. Методика выбора и назначения технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес	61
6.3.2. Выбор и назначение метрологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства	67
6.3.3. Комплексные параметры состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес	74
6.3.4. Комплексный параметр по обеспечению долговечности закаленных крупномодульных зубчатых колес	78
6.3.5. Комплексный параметр по обеспечению минимальных пластических деформаций зубьев закаленных крупномодульных зубчатых колес	83
6.3.6. Качество поверхностного слоя зубьев при чистовой зубообработке крупномодульных закаленных колес	88
6.3.7. Многокритериальная оптимизация двухступенчатого технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе применения комплексных параметров их состояния	94

6.4.	Технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес	109
6.4.1.	Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке	109
6.4.2.	Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания	125
6.4.3.	Оснащение интенсивной и высококачественной зубообработки закаленных колес скоростными дисковыми немодульными фрезами, оснащенными керамикой	128
6.5.	Вопросы для самоподготовки	131
6.6.	Библиография	132
7.	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	146
7.1.	Актуальность применения современных средств измерения	146
7.2.	Устройство и принцип действия КИМ	148
7.3.	Методы координатных измерений	154
7.4.	Классификация измерительных преобразователей	158
7.5.	Задачи моделирования точности в машиностроительном производстве	160
7.5.1.	Моделирование механизма образования погрешности	169
7.5.2.	Моделирование точности механической обработки резанием	185
7.6.	Математические модели и обобщенные структурные схемы измерительных преобразователей (ИП) и измерительных приборов	201
7.6.1.	Энергия систем. Обобщенные силы, действующие в системе. Обобщенные скорости	205
7.6.2.	Меры в измерительной технике	207
7.7.	Синтез измерительных приборов	210
7.7.1.	Приборы с уравниванием механических сил и моментов	211
7.7.2.	Динамические свойства измерительных преобразователей и приборов	221
7.7.3.	Коррекция динамических характеристик измерительных преобразователей	230
7.7.4.	Измерительные приборы с уравниванием электрических величин	235
7.7.5.	Компенсаторы постоянного напряжения	236
7.7.6.	Компенсаторы переменного напряжения	239
7.7.7.	Измерительные мосты	242
7.7.8.	Цифровые измерительные приборы	246
7.7.9.	Применение микропроцессоров в измерительных приборах	253
7.8.	Конструкции и функциональные параметры контрольно-измерительных модулей	255
7.8.1.	Конструкции конструкции и функциональные параметры контрольно-измерительных модулей	255

7.8.2.	Портальные компоновки КИМ	259
7.8.3.	Примеры современных КИМ портального типа	263
7.8.4.	Мостовые компоновки КИМ	269
7.8.5.	Примеры современных КИМ мостового типа	270
7.8.6.	Консольные компоновки КИМ	274
7.8.7.	Столечные компоновки КИМ	276
7.8.8.	Примеры современных КИМ столечного типа с горизонтальной пинолью	279
7.9.	Средства реализации измерений в КИМ	283
7.9.1.	Устройства взаимодействия с измеряемой деталью	283
7.9.2.	Измерительные системы для КИМ производства компании Renishaw plc (Великобритания)	288
7.10.	Программное обеспечение КИМ	305
7.11.	Вопросы для самоподготовки	318
7.12.	Библиография	319
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	321

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

2D	Двухмерное изображение объекта моделирования
3D	Трехмерное изображение объекта моделирования
3D Viewer	Система трехмерной визуализации
CAD	Система автоматизированного проектирования
CADD	Система документирования
CAE	Система моделирования и расчетов
CAM	Автоматизированная система технологической подготовки про-
(АСТПП)	изводства
CAPE	(Concurrent Art-to-Product Environment) — система поддержки параллельного проектирования (concurrent engineering)
CASE	(Continuous Acquisition and Life cycle Support) система разработки и сопровождения программного обеспечения;
DBMS	Data Base Management System
DFD	Data Flow Diagrams
ERP	Enterprise Resource Planning
MRP	Manufacturing Resource Planning
PDM	(Product Data Management) система управления проектными данными, представляющая собой специализированную СУБД (DBMS — Data Base Management System)
VR	Виртуальная реальность
ОАО	Открытое акционерное общество
АНТК	Авиационный научно-технический комплекс
АОМ	Автоматизированный обрабатывающий модуль
АСУ	Автоматизированная система управления
АС	Автоматизированный склад
АТМ	Автоматизированный транспортный модуль
БД	База данных
Д	Деталь
ВС	Вычислительная система
ГАЗ	Гибкий автоматический завод
ГАЛ	Гибкая автоматическая линия
ГАЦ	Гибкий автоматический цех
ГАУ	Гибкий автоматический участок
ГИМ	Генератор имитационных моделей
ГП	Государственное предприятие
ГРВИ	Графический редактор векторных изображений
ДПЗ	Диспетчер производственных заданий
З	Заготовка
ЗВ	Зубчатый венец
ЗК	Зубчатое колесо
ИГ	Измерительная головка
ИМ	Имитационное моделирование

ИМл	Имитационная модель
ИММ	Имитационная математическая модель
ИнИС	Интеллектуальные средства измерения измерительных систем
ИП	Измерительный преобразователь
ИТР	Инженерно-технические работники
ИЭ	Имитационный эксперимент
КАИ	Казанский национальный технический университет имени А.Туполева
КБ	Конструкторское бюро
КГУ	Казанский государственный университет
КИМ	Координатная измерительная машина
КП	Комплексный параметр
ЛИТМО	Ленинградский институт точной механики и оптики
ЛПР	Лицо, принимающее решения
МВТУ	Московское высшее техническое училище
МЗ	Метод зубообработки
МС	Мелкосерийная сборка
МФТИ	Московский физико-технический институт
НИЦ	Научно-исследовательский центр
НОИМ	Национальное Общество Имитационного Моделирования
НПП	Научно-производственное предприятие
ОМР	Обработка металлов резанием
ОРЭС	Области регламентируемых значений ЭС
ПИ	Партия изделий
ПИМ	Подсистема имитационного моделирования
ПМ	Производственный модуль
ПНРТ	Подсистема нормирования ручного труда
ПП	Параллельные процессы
ППТТП	Подсистема проектирования типовых технологических процес- сов
РН	Рабочая нагрузка
РПИ	
РТК	Робототехнический комплекс
РФ	Российская федерация
СК	Система координат
СКД	Система координат детали
СКМ	Абсолютная система координат машины
СКО	Относительная система координат машины
СМ	Системный монитор
СМИ	Сложное машиностроительное изделие
СМО	Система массового обслуживания
СМС	Система мелкосерийной сборки
СНГ	Союз независимых государств
СПИД	Станок, приспособление, инструмент, деталь
СС	Сложная система

СУБД	Система управления базами данных
СЧПУ	Система числового программного управления
ТО	Технологическое оборудование
ТОБ	Технологический объект
ТП	Технологический процесс
ТПП	Технологическая подготовка производства
ТС	Транспортная система
УВК	Управляющий вычислительный комплекс
ФД	Функциональное действие
ФЗ	Функциональная зависимость
ФСА	Функционально-стоимостный анализ
ХТЗ	Харьковский тракторный завод
ЦОРЭС	Целеобразная область регламентируемых значений
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина
ЭИС	Экономическая информационная система
ЭС	Эксплуатационные свойства

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи организации эффективной деятельности машиностроительного производства в условиях постоянно растущих требований потребителей к качеству продукции, ее цене и срокам поставки требует одновременного выполнения комплекса нескольких взаимосвязанных и во многом противоречивых условий обеспечения конкурентоспособности предприятия: 1) – повышение качества; 2 – рост производительности; 3) – снижение затрат; 4) – сокращение сроков освоения продукции; 5) – сокращение длительности производственного цикла и т.д.

Выход отечественного машиностроения из кризиса возможен на основе структурной перестройки предприятий – их разукрупнения [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Структурная перестройка требует ликвидации всех убыточных производств, а также излишних мощностей.

Структурная перестройка должна проводиться комплексно: вместе с изменением структуры и организации производства, структуры управления последними должны соответствующим образом меняться структура выпускаемой продукции, структура технологического оборудования и оснащения, структура производственных и вспомогательных кадров и многое другое.

Организация менеджмента качества – это совокупность рационального сочетания средств и методов управления качеством, взаимосвязи с управляемым процессом или объектом, а также с другими управляющими подсистемами в пространстве и во времени. В этом значении организация менедж-

мента качества обеспечивает создание наиболее благоприятных условий для достижения поставленных целей в установленный период времени при минимальных затратах производственных ресурсов.

Функция планирования качества занимает в системе менеджмента качества центральное место. Функция планирования качества предусматривает определение конкретных задач каждому подразделению и предприятию в целом на различные по длительности плановые периоды.

Функция контроля проявляется в форме целенаправленного воздействия на коллектив людей посредством выявления, обобщения и анализа комплекса показателей качества производственно-хозяйственной деятельности объекта управления и доведения их до руководителей производственных подразделений с целью подготовки необходимых управленческих решений. Эта функция реализуется на основе информации о качестве в ходе выполнения плановых заданий, выявления несоответствий от установленных показателей качества и анализа причин этих несоответствий.

Метод имитационного моделирования – это один из наиболее эффективных методов изучения практически функционирующих и вновь создаваемых объектов любой природы и степени сложности. Сущность этого метода состоит в построении имитационной модели исследуемого объекта и в целенаправленном экспериментировании с этой моделью для изучения поведения в различных условиях.

Метод имитационного моделирования менеджмента качества может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования поведения системы менеджмента качества предприятия. Сугубо экспериментальный характер метода имитационного моделирования обусловлен тем обстоятельством, что имитационная модель системы менеджмента качества, предоставляя возможность экспериментирования с ней, не позволяет получить аналитическое решение задач исследования функционирования системы. Невозможность непосредственного получения аналитических зависимостей характеристик и поведения системы менеджмента качества предприятия

является наиболее существенным недостатком имитационного моделирования.

Несмотря на отмеченный недостаток, метод имитационного моделирования представляет собой более мощный инструмент исследования, чем классический аппарат математического анализа. Это объясняется тем, что имитационная модель исследуемого объекта может быть построена и экспериментально изучена и в том случае, если объект не поддается изучению аналитическими методами. Система менеджмента качества машиностроительного предприятия является как раз таким объектом, для которого в силу большого числа и разнообразия функций аналитическое решение задачи исследования характеристик и поведения системы существенно затруднено или практически невозможно.

В ходе имитационного эксперимента компьютер имитирует функционирование системы и вычисляет характеристики свойств, проявляемых системой.

Имитационный эксперимент подобен натурному эксперименту, однако в отличие от натурального метода позволяет экспериментировать с системами, которых еще или уже нет, а также предсказывать поведение существующих систем в будущем, изучать их поведение в чрезвычайных ситуациях. Он дешевле и быстрее натуральных экспериментов. Относительно социального натурального эксперимента, необходимость в котором постоянно возникает в процессе управления, следует отметить, что это немалый риск, сопряженный с этическими проблемами.

Данное учебное пособие является одним из шагов к широкому применению в реальном производстве методов имитационного моделирования (ИМ) с целью его совершенствования во всех аспектах производственного процесса: проектирование – производство – контроль.

Учебное пособие ориентировано на специалистов в области организационно-технической и технологической подготовки производства, а также для студентов машиностроительных специальностей для механосборочного про-

изводства.

Учебное пособие состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованной литературы, библиографии и приложений:

Во введении выполнена оценка состояния машиностроительного производства в Украине, описаны причины падения машиностроительного производства, намечены пути его выхода из кризиса. Определено место имитационного моделирования в организации менеджмента качества производственного процесса, описаны цели и задачи, решаемые методами ИМ. Сформулированы принципы разработки имитационных моделей (ИМл), проанализированы достоинства и недостатки ИМ. Описаны области, в которых применение ИМ наиболее эффективно.

В первом разделе описана историография становления и применения имитационного моделирования; выполнен анализ современного состояния и тенденции развития ИМ; определены основные направления применения ИМ в странах СНГ; описаны области применения наиболее широко распространенных программных продуктов ИМ в промышленности.

Во втором разделе сформулированы основные понятия имитационного моделирования: определено понятие «имитационное моделирование»; выполнены классификации имитационных моделей (ИМл) и языков моделирования; описаны различные варианты структур ИМл; проведена классификация языков моделирования и определены области их рационального использования.

В третьем разделе сформулированы принципы построения имитационных моделей сложных машиностроительных производств: описаны особенности построения ИМл сложных систем (СС); описаны методы представления рабочих нагрузок в ИМл СС; приведена методика выбора языка моделирования СС; описаны принципы декомпозиции СС и выбора типа временной шкалы ИМл; сформулированы принципы разработки ИМл механосборочных производств в зависимости от размеров производства, структуры выполняемых операций и влияния вероятностных факторов на достижение требуемых

результатов; описана методика исследования чувствительности ИМл СС; выполнен анализ достоинств и недостатков применения ИМл в различных организационно-технических и технологических задачах машиностроительного производства; приведен перечень применения программных продуктов имитационного моделирования и дана их краткая характеристика.

В четвертом разделе сформулированы принципы декомпозиции имитационных моделей металлообрабатывающего производства. Определено понятие технологического инжиниринга систем обработки металлов резанием методами на основе инструментальных средств ИМ с использованием 2D – визуализации. Приведены примеры синтеза организационно-технологической структуры ГАУ для обработки детали «Кронштейн» в цехе "Тракторный-5" Харьковского тракторного завода и реинжиниринга организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхний».

В пятом разделе предложены решения задач технологического инжиниринга систем сборки методами имитационного моделирования. Описаны особенности сборки сложных машиностроительных изделий в условиях мелкосерийного производства. Сформулированы принципы функционирования и разработки организационно-технологических структур СМС СМИ. Определены критерии оценки эффективности функционирования СМС СМИ. Описаны структурная, логико-лингвистическая, функциональная модели СМС СМИ. Приведена модель выбора системы оценок эффективности функционирования СМС СМИ. Сформулирован многокритериальный подход к формированию оптимального технологического процесса сборки в условиях мелкосерийного производства. Проведен анализа существующих организационно-технической и технологической структур сборочного производства на примере ГП «ФЭД», г. Харьков.

В шестом разделе предложен подход к оптимизации рабочих процессов (на примере обработки крупномодульных зубчатых колес) на основе построения и анализа имитационных моделей технологических процессов их произ-

водства. Рассмотрены геометрические, физические, кинематические и технологические аспекты формирования имитационной модели процесса изготовления зубофрезерованием зубчатого колеса. Сформулированы общие принципы оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес. Предложены математические модели прогнозирования структуры и параметров технологических систем зубообработки крупномодульных зубчатых колес, съема припуска при зубофрезеровании, технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес, структурных свойств системы обработки. На их основе разработана методика выбора и назначения технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес, которая легла в основу системы многокритериальной оптимизации двухступенчатого технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес. Предложены схемы выбора технологического оснащения для интенсивной и высококачественной зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.

В седьмом разделе рассмотрены подходы к применению методов имитационного моделирования в задачах технологического контроля. Выполнена оценка актуальности применения современных средств измерения. Описаны устройство и принцип действия КИМ, методы координатных измерений. Дана классификация измерительных преобразователей. Сформулированы задачи моделирования точности в машиностроительном производстве через механизм образования погрешности обработки. Предложены математические модели и обобщенные структурные схемы измерительных преобразователей (ИП) и измерительных приборов. Приведены примеры применения различных конструкций контрольно-измерительных приборов в машиностроении вообще и в механообработке в частности. Описана структура программного обеспечения контрольно-измерительных модулей.

В заключении определены перспективы дальнейшего развития средств имитационного моделирования в машиностроении. Сформулированы предпосылки их широкого внедрения на производстве.

6. ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ

6.1. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования

Общая имитационная модель формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом. Рассмотрим новый подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес (ЗК), базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте – Карло.

Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей, а также задачи управления, в том числе оптимального этими погрешностями.

В соответствии с действующим ГОСТ1643 – 81 погрешности изготовления зубчатых колес [11] уровня обеспечения точности не ниже, чем требуемая, могут быть сформулированы в виде (6.1)

$$ES_i \leq EI_i \leq f\Delta i(\alpha) \quad (6.1)$$

где $f\Delta i(\alpha)$ – функция зависимости i – й погрешности зубчатого венца (ЗВ) от фазового угла реального профиля зубчатого колеса (α);

ES_i – минимальное значение i – й погрешности;

EI_i – максимальное значение i – й погрешности.

Таким образом, требования к точности изготовления ЗВ по обеспечению, к примеру, кинематической точности должны состоять из ограничений на радиальное биение и колебание длины общей нормали (согласно ГОСТ

1643 – 81) и двух функциональных зависимостей радиального биения и колебания длины общей нормали от фазового угла поворота ЗК (6.2) и (6.3)

$$EI_{Frr} \leq ES_{Frr} \leq f_{Frr}(\alpha), \quad (6.2)$$

$$EI_{Fwr} \leq ES_{Fwr} \leq f_{Fwr}(\alpha) \quad (6.3)$$

Таким образом, согласно изложенному выше, возникает потребность в получении функциональных зависимостей погрешностей от фазового угла поворота ЗК.

Анализ механизмов формирования погрешностей ЗВ свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности ЗК.

Так как исследуемые погрешности обработки возникают в результате воздействия ряда случайных факторов, характеристики которых, в зависимости от уровня сложности структурного строения погрешностей, являются величинами или функциями, носящими случайный характер проявления, их определение возможно с использованием методов теории вероятностей.

В соответствии с этим, для решения данной задачи, с целью повышения объективности получаемой информации, экономии временных и материальных затрат, наиболее целесообразным представляется применение методики статистического моделирования (метода Монте – Карло).

Исходя из изложенного выше, разработана общая модель формирования ЗВ при механической обработке, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 6.1.

Согласно предложенной модели, профиль изделия при механической обработке есть результат пересечения пространственных множеств A и B (6.4)

$$C = A + B. \quad (6.4)$$

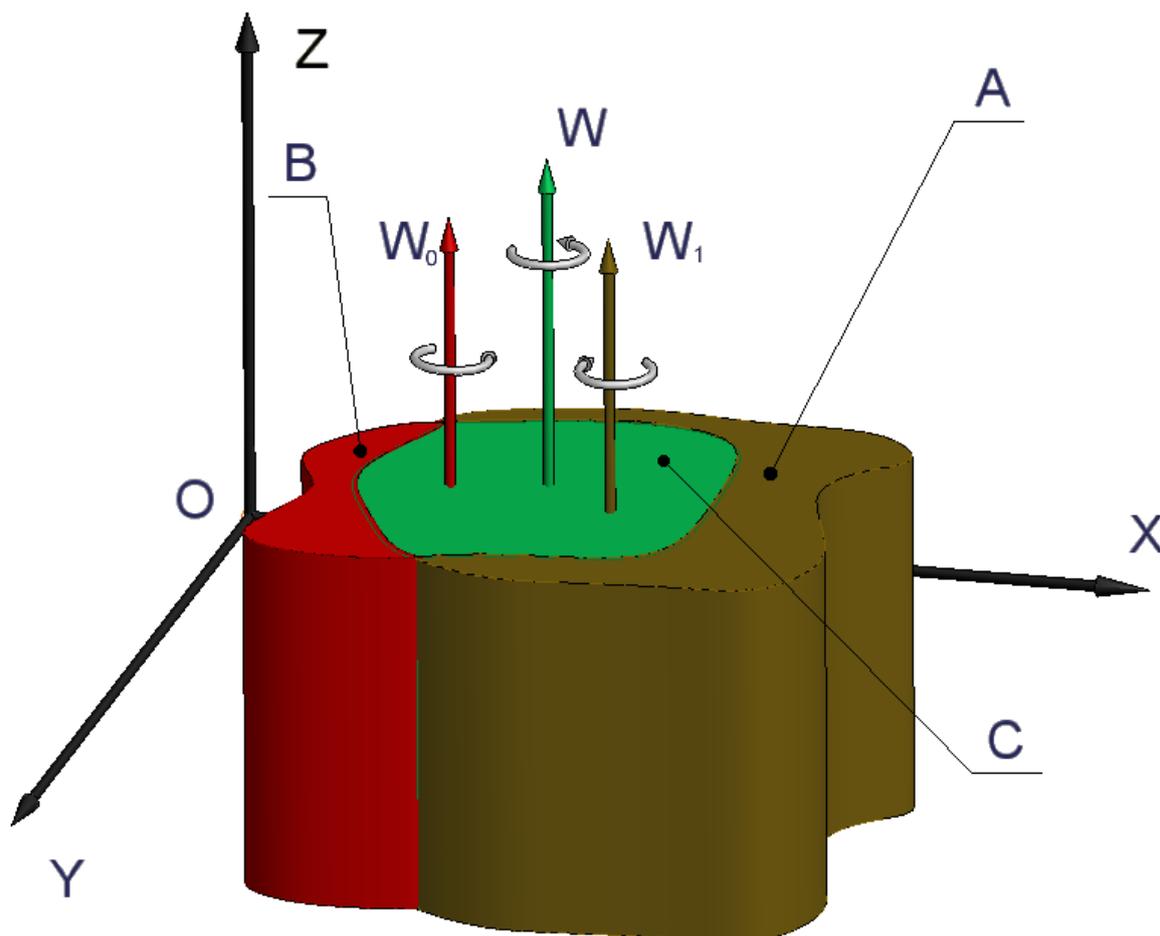


Рис 6.1. Общая модель формирования ЗК при механической обработке:
 A – пространственный профиль обрабатывающего контура;
 B – пространственный профиль обрабатываемого контура;
 C – пространственный профиль образованного контура изделия;
 W_0 – ось концентрации обрабатываемого контура;
 W_1 – ось концентрации обрабатывающего контура;
 W – ось концентрации образованного контура изделия

Пространственные же множества образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей.

Для построения расчетной схемы статистического моделирования стохастической модели элементарные технологические погрешности разбиваются на три вида: погрешности, сдвигающие ЗК в плоскости обработки и тем самым создающие геометрический эксцентриситет, перекашивающие погрешности, создающие перекося плоскости обработки ЗК и погрешности, про-

вращающиеся плоскость обработки и создающие кинематический эксцентриситет.

Далее, согласно расчетной схеме (рис. 6.2), моделирование погрешности обработки ЗК выполняется на основе расчета кинематического эксцентриситета в 2 этапа:

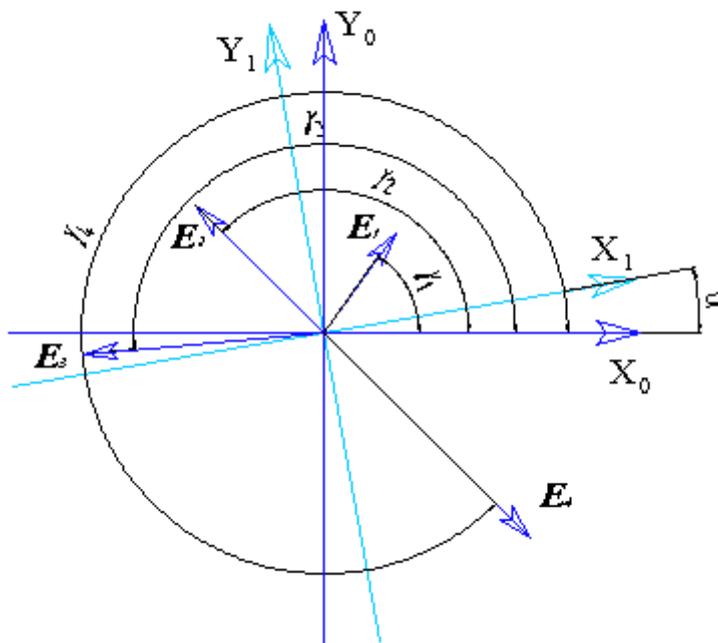


Рис 6.2. Расчетная схема кинематического эксцентриситета погрешности обработки ЗК

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение вектора j – й технологической погрешности $m(E_j)$, который будет рассчитываться:

– по (6.5), если погрешность распределена в соответствии с законом равной вероятности

$$m(E_j) = R_{[0;1]} E_j. \quad (6.5)$$

где $m(E_j)$ – моделируемое значение элементарной составляющей погрешности;

$R_{[0,1]}$ – равномерно распределенная на интервале $[0,1]$ случайная величина;

E_j – величина элементарной составляющей погрешности

– по (6.6) при любом другом виде закона распределения E_j

$$\int_{-\infty}^{m(E_j)} f(E_j) dE = R_{[0,1]}, \quad (6.6)$$

где $f(E_j)$ – функция плотности вероятности распределения случайной величины элементарной составляющей погрешности.

При этом необходимо, чтобы смоделированная случайная величина $m(E_j)$ по вероятности (при $n \rightarrow \infty$) сходилась к искомой величине E_{jr} , т.е. для любого бесконечно малого $\varepsilon > 0$ должно выполняться соотношение (6.7)

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P \left[\sum_{i=1}^m (m(E_j) - E_{jr})_m < \varepsilon \right] = 1, \quad (6.7)$$

где P – соответствующая вероятность;

m – количество смоделированных значений;

E_{jr} – искомая (реальная) величина элементарной составляющей погрешности;

б) моделирование угловых положений векторов Q_j (рис. 6.3)

$$m(\gamma_j) = R_{[0,1]} 360^\circ = R_{[0,360^\circ]}, \quad (6.8)$$

где $R_{[0,1]}$, $R_{[0,360^\circ]}$ – соответственно равномерно распределенная случайные величины на интервалах $[0, 360^\circ]$, $[0, 1]$;

$m(\gamma_j)$ – моделируемое значение угла поворота вектора j – й составляющей погрешности.

2. Производится моделирование обработки ЗК:

Для этого выполняется поворот осей координат на угол α , и тем самым воспроизводится движение обката, возникающее при обработке ЗК. При этом эксцентриситет E (сдвиг плоскости обработки ЗК) равен сумме проекций всех эксцентриситетов на ось X (6.9):

$$E(\alpha) = \sum_{j=1}^m (E_j \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (6.9)$$

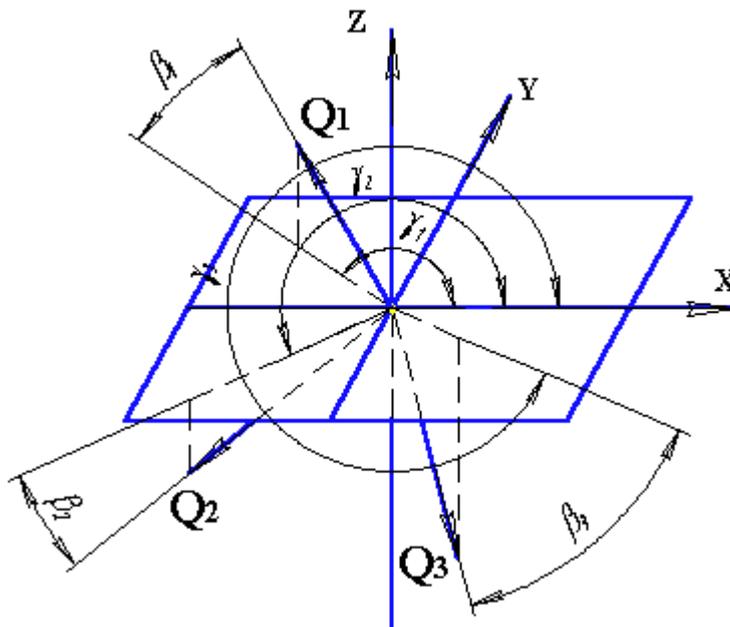


Рис 6.3. Расчетная схема перекоса плоскости обработки:
 Q_j – нормальные вектора плоскостей перекоса;
 β и γ углы, характеризующие их положение в пространстве относительно
 плоскости обработки ЗК

Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° , получим функциональную зависимость эксцентриситета от фазового угла поворота зубчатого колеса $E(\alpha)$, (рис 6.4, а).

Расчет суммарного перекоса плоскости обработки Q производится по схеме, представленной на рис 6.3.

Суммарный перекос определяется аналогично моделированию эксцентриситета:

1. Производится моделирование положения ЗВ в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение нормального вектора j – й плоскости перекоса по аналогии с (6.5 ÷ 6.7);

б) моделируется угловое положение этих векторов $m(\gamma_j)$ и $m(\beta_j)$ по (6.10 и 6.11)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^\circ, \quad (6.10)$$

$$m(\beta_j) = R_{[-90^\circ;90^\circ]}, \quad (6.11)$$

где $R_{[0, 360^\circ]}$, $R_{[0,1]}$, $R_{[-90^\circ, 90^\circ]}$ – соответственно равномерно распределенная на интервалах $[0,360^\circ]$, $[0,1]$, $[-90^\circ,90^\circ]$ случайные величины;

$m(\gamma_j)$, $m(\beta_j)$ – моделируемые значения характеристических углов j – о технологического перекоса.

2. Производится моделирование обработки ЗК:

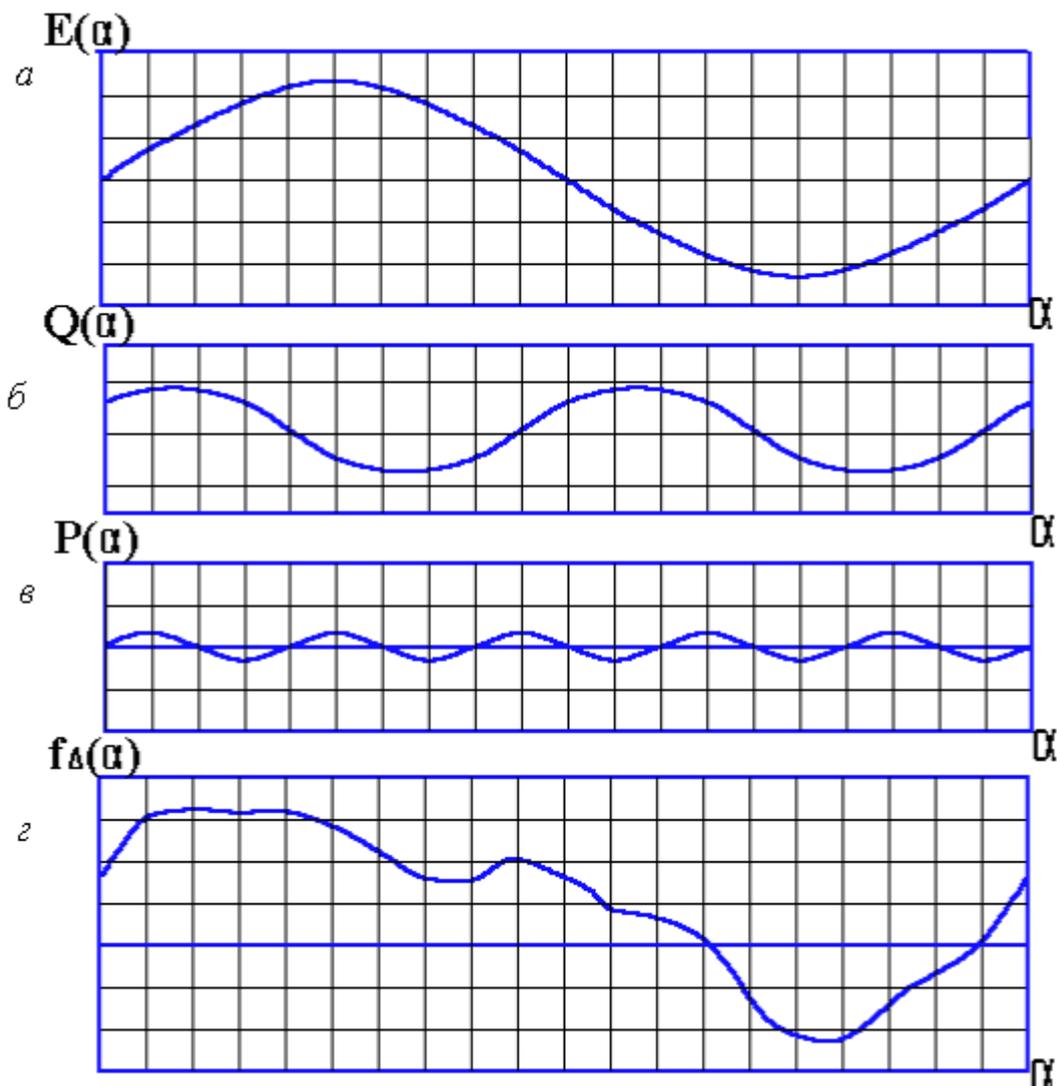


Рис 6.4. Схема формирования функциональной зависимости погрешностей венца (E , Q , P , $f\Delta$) от фазового угла поворота ЗК (α)

Перекас плоскости обработки приводит к возникновению вертикальной $Q_B(\alpha)$ и горизонтальной $Q_G(\alpha)$ составляющих погрешности профиля ЗВ (6.12 и 6.13)

$$Q_B(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \sin(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)), \quad (6.12)$$

$$Q_G(\alpha) = \sum_{j=1}^m (Q_j \cos(\beta_j) \cos(\gamma_j - \alpha)). \quad (6.13)$$

Если исследуемая погрешность носит только радиальный характер в качестве Q принимается Q_G . Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° , получим функциональную зависимость перекаса Q от фазового угла поворота ЗК (рис 6.4, б).

Моделирование третьего типа погрешностей происходит следующим образом:

1. Выполняется моделирование значения погрешности P_j согласно (6.4 ÷ 6.6).

2. Выполняется моделирование начального фазового угла (6.14)

$$m(\varphi_j) = R_{[0,1]} \frac{\pi}{2} = R_{\left[0, \frac{\pi}{2}\right]}, \quad (6.14)$$

3. Выполняется моделирование обработки ЗК (6.15)

$$P(\alpha) = \sum_{j=1}^m (P_j \cos(\varphi_j + \alpha T)), \quad (6.15)$$

где T – период колебаний $T = 2\pi/z$;

z – число зубьев исследуемого ЗК.

Таким образом, произведя полный оборот координатных осей ЗК от 0° до 360° получим функциональную зависимость кинематического эксцентриситета P от фазового угла α поворота зубчатого колеса (рис 6.4, в).

Пользуясь принципом суперпозиции, получим функциональную зависимость погрешности венца от фазового угла поворота ЗК $f\Delta(\alpha)$ (6.16)

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha). \quad (6.16)$$

Пример результатов моделирования представлен на (рис 6.4, з).

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса обработки.

Известно, что специфика червячного зубофрезерования состоит в том, что характер динамических параметров обработки в значительной степени обуславливается изменением во времени геометрических и кинематических характеристик (толщин срезаемых слоев и величин кинематических передних и задних углов для всех точек периметра режущих кромок всех работающих зубьев червячной фрезы), (6.17)

$$\vec{D}_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L \vec{D}(a_i, \alpha_i, \gamma_i) dl, \quad (6.17)$$

где \vec{D}_t – вектор динамических параметров процесса обработки;

z_0 – число реек червячной зуборезной фрезы;

z_i – число зубьев i -й рейки фрезы;

a_i – мгновенная толщина срезаемого слоя в рассматриваемой точке режущей кромки;

μ и α_i – мгновенные значения кинематических переднего и заднего углов для рассматриваемой точки;

L – параметр режущей кромки.

Задача структурной и параметрической идентификации моделей вида (6.17) по экспериментальным данным является задачей чрезвычайно большой размерности, не имеющей единственного решения. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (в частности, работы В.Н. Башкирова, К. Ziegler, G. Sulzera и др.) свидетельствуют о наличии значимой монотонной связи между площадью слоя, срезаемого зубьями фрезы, и динамическими параметрами процесса обработки.

В качестве интегральной характеристики состояния процесса обработки, как правило, используется мгновенная площадь слоя F_t , срезаемого каждым из зубьев фрезы. Тогда модель (6.17) может быть представлена в виде (6.18)

$$F_t = \sum_{i=1}^{\bar{z}_0} \sum_{j=1}^{\bar{z}_i} \int_L a_l dl. \quad (6.18)$$

Характер связи между параметрами \bar{D}_t и F_t позволяет предположить наличие аналогии между представлениями этих сигналов в частотной области. Кроме того, разработанные методы позволяют определить мгновенные значения α_1 , γ_1 и α_1 для любой точки любого зуба фрезы.

В модели учтены особенности процесса обработки, обусловленные следующими факторами: фактической формой режущих кромок (схемой резания, типом червяка); углами установки фрезы, наклона стружечных канавок, подъема витков фрезы; числом заходов и реек фрезы; углом наклона и числом зубьев колеса и т.д. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования.

Метод и алгоритм построения математической модели червячной зуборезной фрезы. Режущая кромка зуба фрезы представляется плоским «примитивом» – упорядоченным списком точек плоскости, заданных их координатами в системе координат (СК) $X_K Y_K$, связанной с зубом фрезы (рис. 6.5).

Количество типов примитивов зависит от схемы резания червячной фрезы, количество точек в каждом из примитивов определяется конструкцией фрезы и заданной точностью описания. Червячная зуборезная фреза представляется «комплексом примитивов», количество и пространственное размещение которых в СК фрезы $X_0 Y_0 Z_0$ определяется типом и конструкцией фрезы (рис. 6.5). Размещение модели фрезы в СК $X_Z Y_Z Z_Z$ связанной с заготовкой (рис. 6.6), производится на основе метода первоначального позиционирования и заключается в назначении начальных координат центра СК $X_0 Y_0 Z_0$ в СК $X_Z Y_Z Z_Z$.

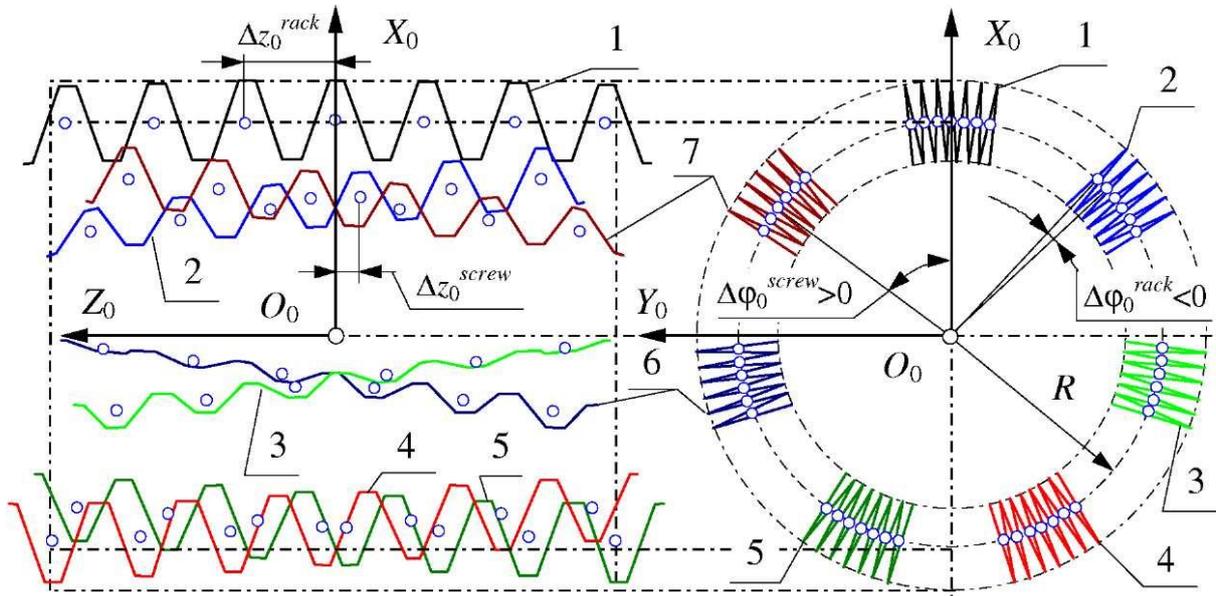


Рис. 6.5. Графическое представление математической модели двухзаходной правозаходной червячной зуборезной фрезы

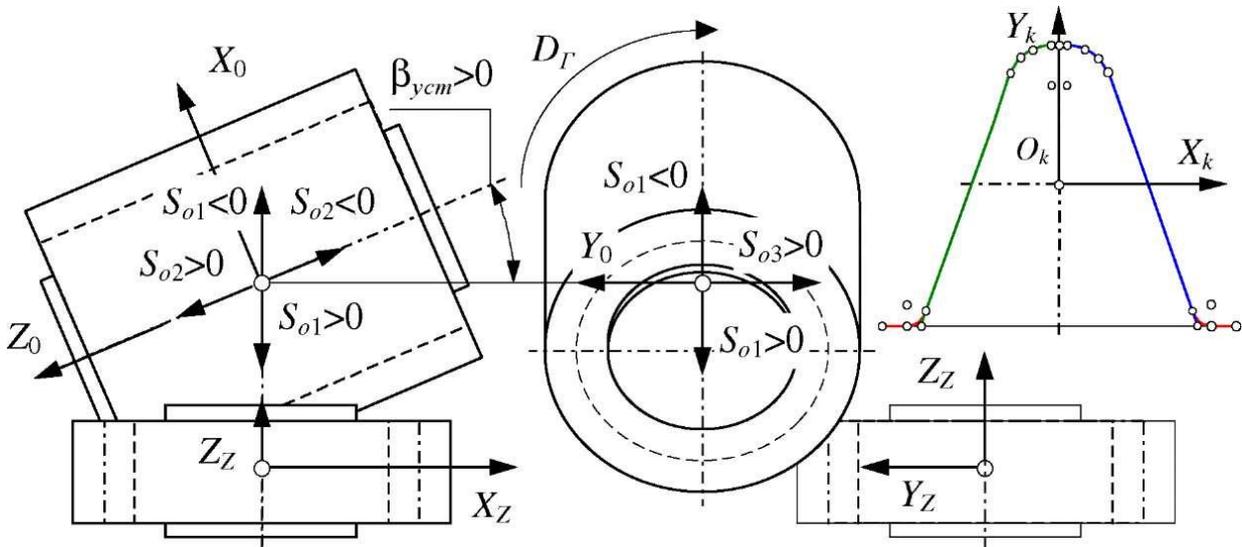


Рис. 6.6. Системы координат и соглашения о знаках движений подачи

Моделирование перемещения фрезы осуществляется посредством «алгоритма прямой трассировки зубьев». Для этого введены понятия «передаточное отношение фреза – заготовка (i_{01})» и «квант перемещения фрезы в результате главного движения резания, движений обката и подач ($\Delta\varphi_0$)» (6.19)

$$\begin{cases} i_{01} = -\text{sign}(\gamma_{m0}) \left[\frac{z_1}{n_{z0}} - \frac{S_{02}}{2 \times \pi \times R \times \text{tg}(\gamma_{R0})} \right] \times \left[1 - \text{sign}(\gamma_{m0}) \times \frac{S_{01} \sin(\beta)}{z_1 \times \pi \times m} \right], \\ \Delta\varphi_0 = -\frac{2\pi}{n_{hob}}, \Delta\varphi_Z = \frac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}, \Delta S_{01} = S_{01} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{02} = S_{02} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|, \Delta S_{03} = S_{03} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|. \end{cases} \quad (6.19)$$

где m – модуль;

i_{01} – передаточное отношение «фреза-заготовка»;

Z_1 – число зубьев колеса;

n_{z0} – число заходов фрезы;

R – радиус, на котором расположены центры примитивов (в частном случае $R = d_{m0}/2$, d_{m0} – средний расчетный диаметр фрезы);

γ_{m0} – угол подъема витков фрезы на цилиндре радиуса R ;

β – угол наклона зубьев колеса;

S_{01} – подача фрезы в направлении оси заготовки (встречная/попутная);

S_{02} – осевая подача фрезы;

S_{03} – радиальная подача;

n_{hob} – число «тактов моделирования» на оборот фрезы.

Кванты перемещений $\Delta\varphi_0$, $\Delta\varphi_Z$, ΔS_{01} , ΔS_{02} , ΔS_{03} в дальнейшем используются для определения положений зубьев фрезы в СК, связанной с заготовкой, на любом такте моделирования q .

Метод оценки мгновенного состояния процесса обработки основан на восстановлении формы поверхности, обрабатываемой каждым из зубьев фрезы в каждый из моментов времени. Для восстановления формы обрабатываемой поверхности используются функциональные зависимости (ФЗ), определяющие «траектории обратной трассировки» зубьев – гладкие пространственные кривые, по которым зубья, формировавшие обрабатываемую поверхность (« k_z – прошедшие» зубья), приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования (рис. 6.7).

ФЗ обратной трассировки представляют собой векторные функции вида $G_z^r(i, j, q, k_z, \tau)$, моделирования q , где $G_z^r(\cdot)$ – вектор координат центра k_z –

прошедшего примитива в СК $X_Z Y_Z Z_Z$, q – индекс такта моделирования, τ – «глубина обратной трассировки».

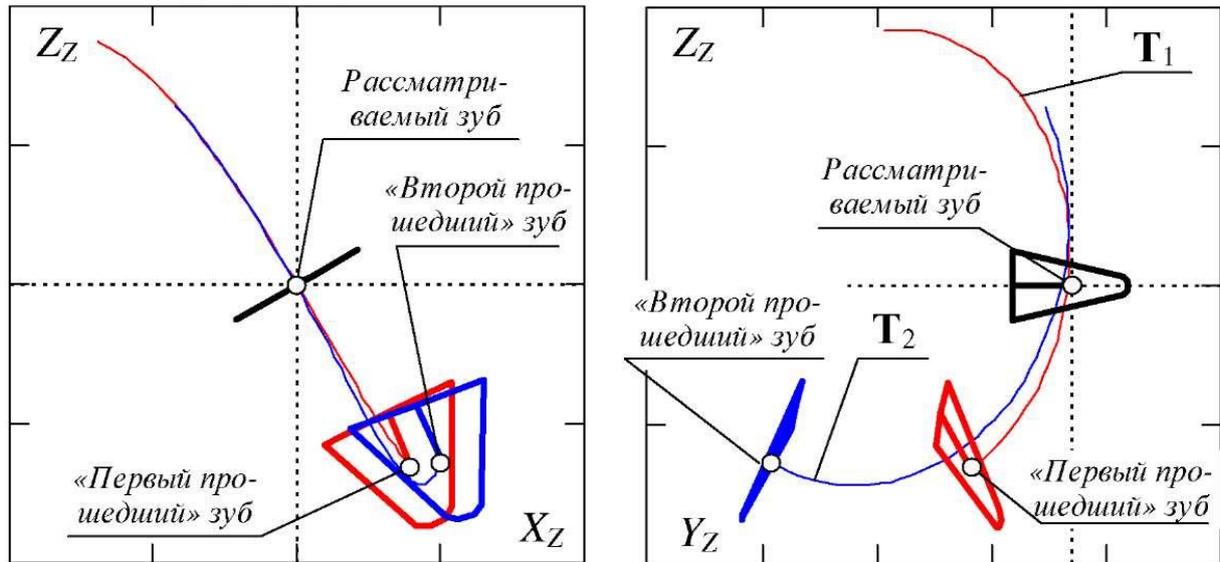


Рис. 6.7. Траектории обратной трассировки «прошедших» зубьев

Для выбора единственного положения каждого из k_z – прошедших примитивов, представляющих обрабатываемую поверхность, используется критерий минимизации евклидовой метрики (6.20) как функции глубины трассировки τ

$$R(i, j, q, k_z, \tau) = G_z(i, j, q, 0), G_z^\tau(i, j, q, k_z, \tau), \quad (6.20)$$

где $G_z(i, j, q, 0)$ – вектор координат в СК $X_Z Y_Z Z_Z$ центра рассматриваемого примитива на такте моделирования q ;

T_k – траектория обратной трассировки центра примитива k_z – прошедшего зуба.

Применение такого подхода позволяет построить операциональное определение срезаемого слоя рассматриваемым зубом фрезы $[S_{i,j}]_q$ на заданном такте моделирования q , в форме геометрического отношения, заданного на рассматриваемых «оттрассированных» примитивах $[P_{i,j}]_q$ (6.21)

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[[P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[\cup_{k_z=1}^{k_{z0}} [T [P_{i-k_z,j}]_q] \right] \right], \quad (6.21)$$

где T – оператор обратной трассировки $[P_{i-k_z,j}]_q$ прошедшего примитива;

K_{z0} – цикл схемы резания;

D_{a1} – фигура, образованная рассечением тела заготовки плоскостью рассматриваемого примитива.

Т.е. ф-ла (6.15) – оценка мгновенной площади слоя, срезаемого любым зубом фрезы на заданном такте моделирования q . Для реализации метода расчета по (6.21), используются следующие алгоритмы (рис. 6.8)

1. Алгоритм определения глубины обратной трассировки τ , доставляющей минимум функции $R(i, j, q, k_z, \tau)$.
2. «Алгоритм отсечения», который используется для выделения и удаления участков примитивов, находящихся вне тела заготовки.
3. Алгоритм перевода оттрассированного примитива в систему координат рассматриваемого примитива.
4. Алгоритм построения пересечения и объединения плоских фигур, заданных списками точек.
5. Алгоритм определения площади плоской фигуры.

Метод, основанный на использовании ФЗ обратной трассировки, позволяет также восстанавливать форму поверхности, обработанной на обороте заготовки, предшествовавшем рассматриваемому переходу. Все разработанные алгоритмы объединены в общем алгоритме обратной трассировки зубьев и могут использоваться также (кроме алгоритма определения площади) для определения иных (помимо мгновенной площади срезаемого слоя) мгновенных геометрических параметров процесса обработки (a_1, γ, α) .

Имитационная математическая модель (ИММ) процесса обработки представляет собой комплекс формальных методов и реализующих их алгоритмов. ИММ позволяет с любой степенью детализации анализировать процесс обработки с точки зрения его геометрических закономерностей, рис. 6.8.

Разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных средств измерительных систем (ИИС). На рис. 6.9 представлена общая структура алгоритмического обеспечения ИИС. Она применяется для формирования динамической системы частотных фильтров $\{H(f)\}$, использующихся для численного выделения системы информативных параметров процесса обработки $\left\{ \left[\phi(t_j) \right]_{\Delta t \phi} \right\}$ на фоне шумов.



Рис. 6.8. Схема разработанных методов и алгоритмов моделирования обработки ЗК

Разработаны оптимальные конструкции червячных зуборезных фрез и выполнена оптимизация схемы резания по критерию разделения «П – образных» слоев зубьями фрезы, критичными с точки зрения износа.

Применение ИММ геометрических параметров процесса зубофрезерования является средством сокращения объемов длительных и дорогостоящих

экспериментальных исследований. На основе приведенных моделей выполнена оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи).

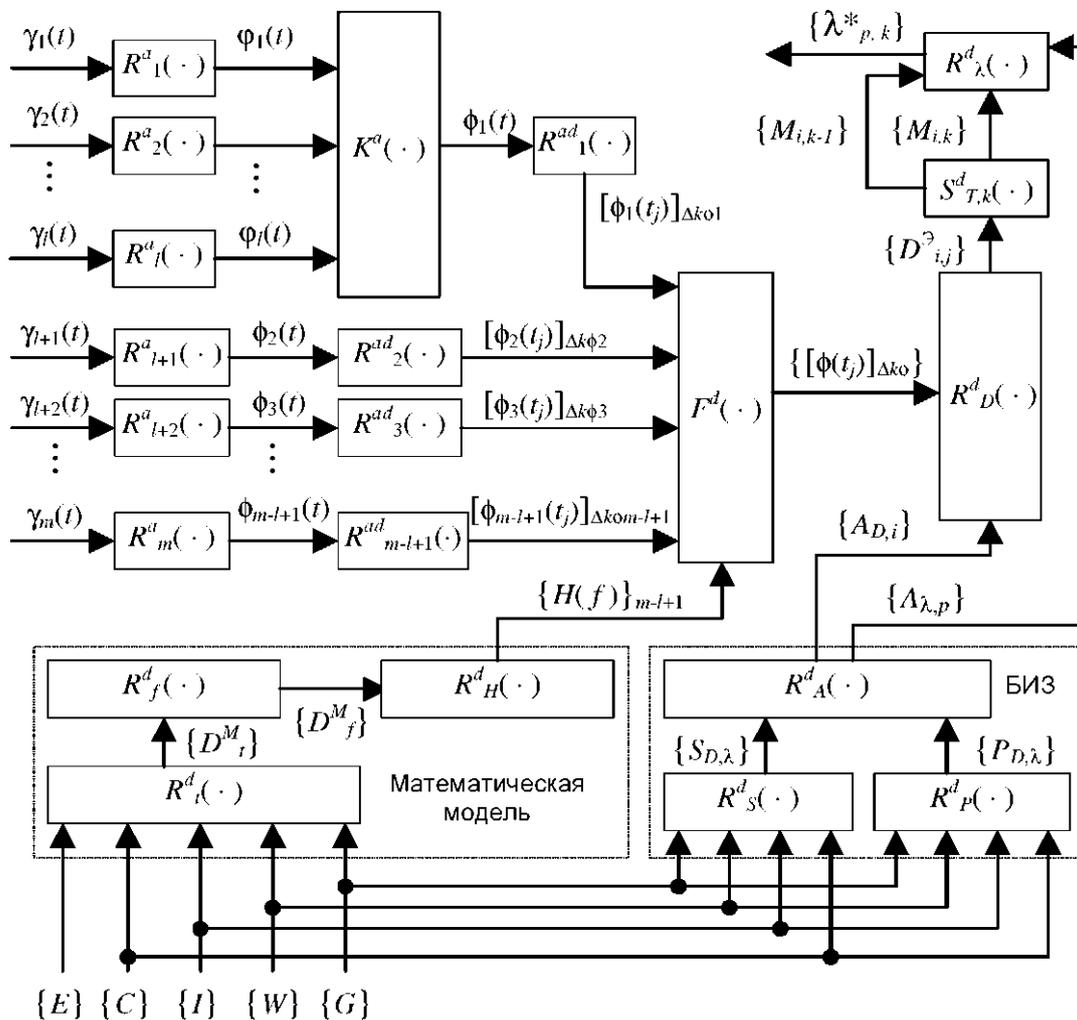


Рис. 6.9. Структура ИНИС косвенных измерений динамических параметров процесса червячного зубофрезерования

Проверка адекватности модели проводится путем анализа сигналов площади срезаемого слоя (рис. 6.10) и сигналов окружной силы резания, полученных экспериментальным путем и путем моделирования

Основные методы и алгоритмы моделирования реализованы в рамках программного комплекса «ФРЕЗА». Комплекс включает в себя модули расчета и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций.

В то же время, модель обработки ЗК на основе ИММ не может быть непосредственно использована для исследования процесса внутреннего и конусного зубофрезерования, для моделирования обработки фрезами, имеющими заборный конус или криволинейную образующую.

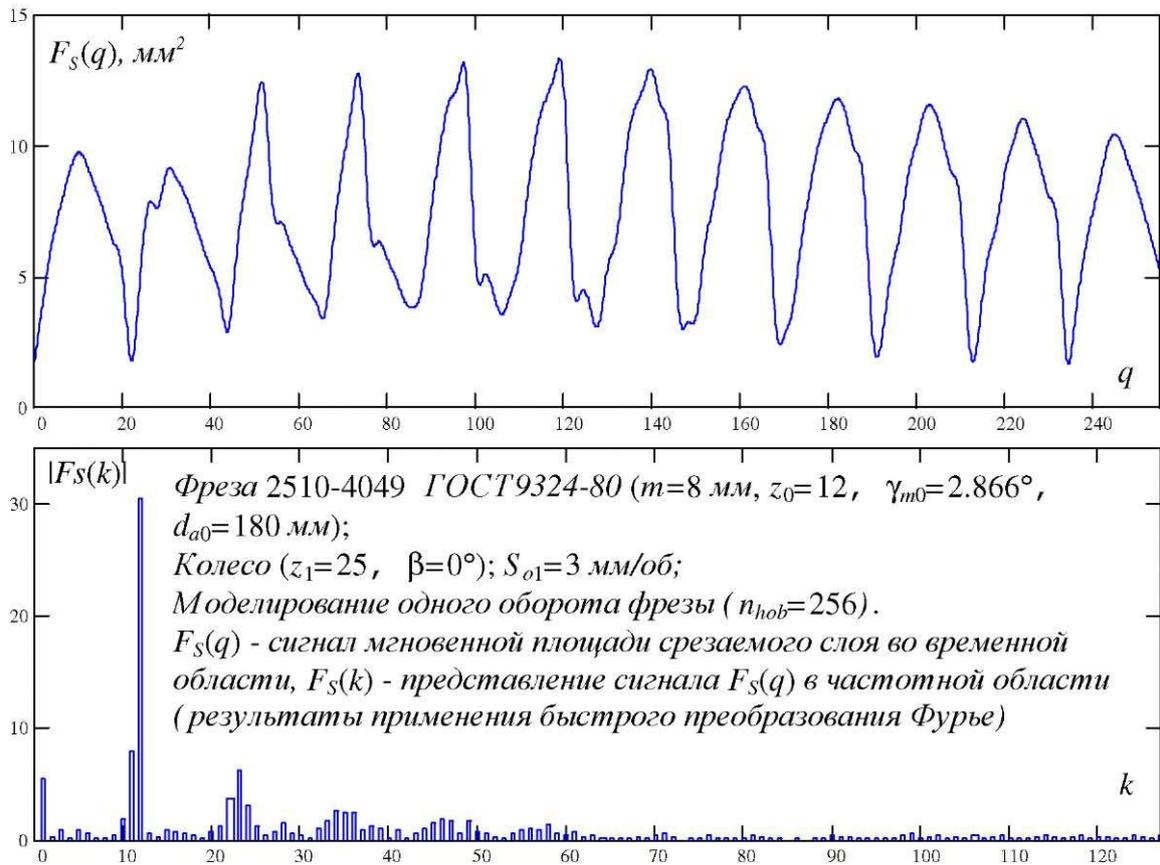


Рис. 6.10. Представление во временной и частотной области сигнала мгновенной площади срезаемого слоя

6.2. Математическая модель прогнозирования структуры и параметров технологических систем зубообработки крупномодульных зубчатых колес

6.2.1. Общие принципы оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес

Задачи моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес (рис. 6.11) предлагается решать методами технологического воздействия с учетом специфических условий формообразования зубчатых колес [94].

При зубофрезеровании эвольвентной поверхности зубчатого колеса перемещение режущего лезвия инструмента из начального положения в конеч-

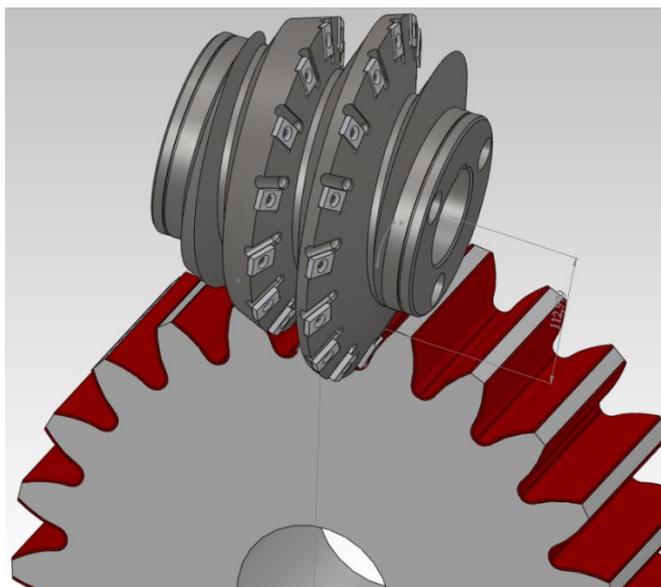


Рис. 6.11. 3D модель взаимодействия инструмента и заготовки при зубофрезеровании

ное положение под действием управляющих воздействий и может быть осуществлено по различным траекториям в рамках технологических и технико-экономических ограничений. Каждой траектории соответствует определенное значение критерия оптимальности.

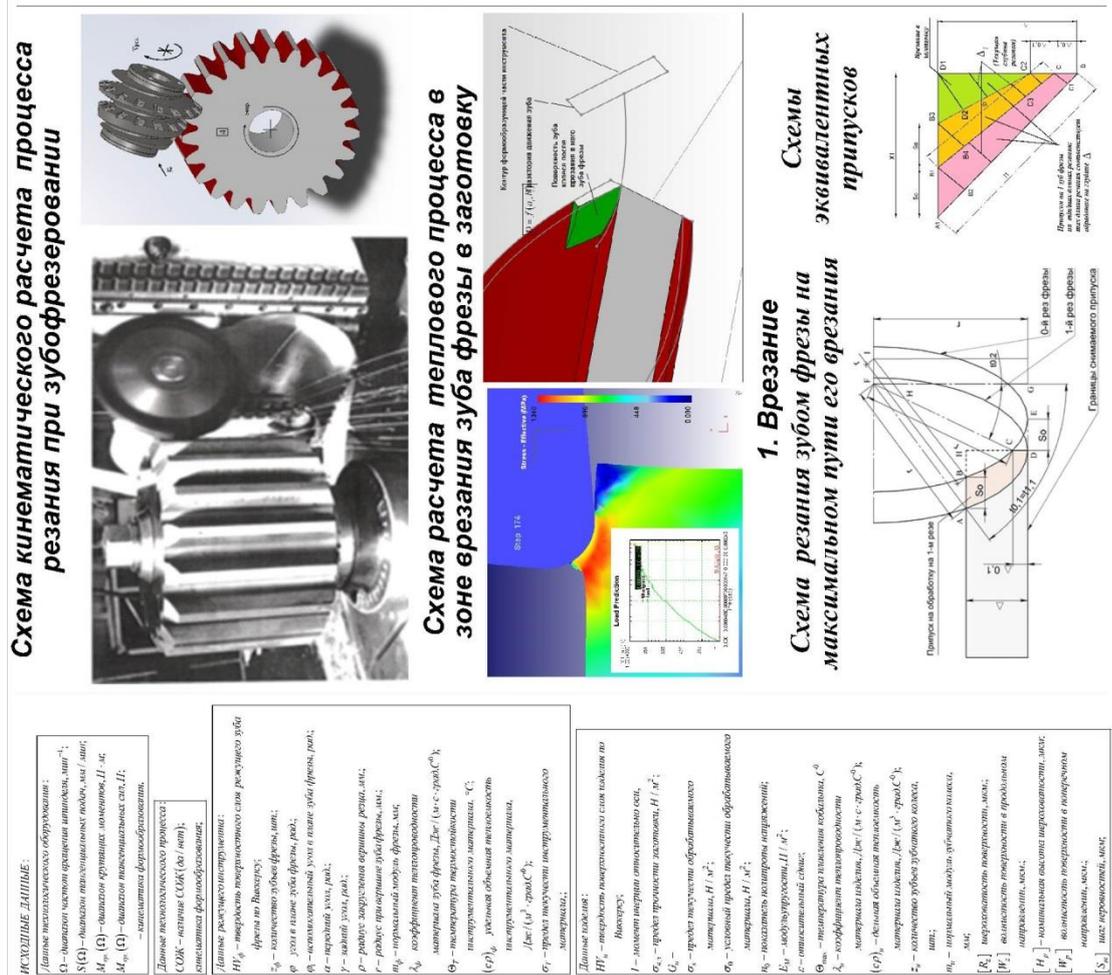
Математическое моделирование оптимального управления параметрами точности, качества и производительности

зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес выходит на изменение процессов формообразования поверхностного слоя зубчатых колес

во времени и рассматривается в динамике в виде схемы двухпараметрического адаптивного управления процессом скоростного зубофрезерования при формировании поверхностного слоя (рис. 6.12) [38].

Задача оптимального управления процессом зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес дифференциально аппроксимируется на два этапа: первый связан с обоснованием выбора значений технологических параметров режима резания, удовлетворяющих заданному критерию качества, параметрами формирования толщины срезаемого слоя глубины резания (рис. 6.13); второй – предполагает управление режимами резания с целью поддержания оптимального значения показателя критерия качества в условиях действия на процесс возмущающих воздействий.

В том случае, когда основными показателями оценки режимов резания является обеспечение точность обработки и качества поверхностного слоя, в качестве критерия оценки процесса используют коэффициент функционального формирования поверхностного слоя – K_p .



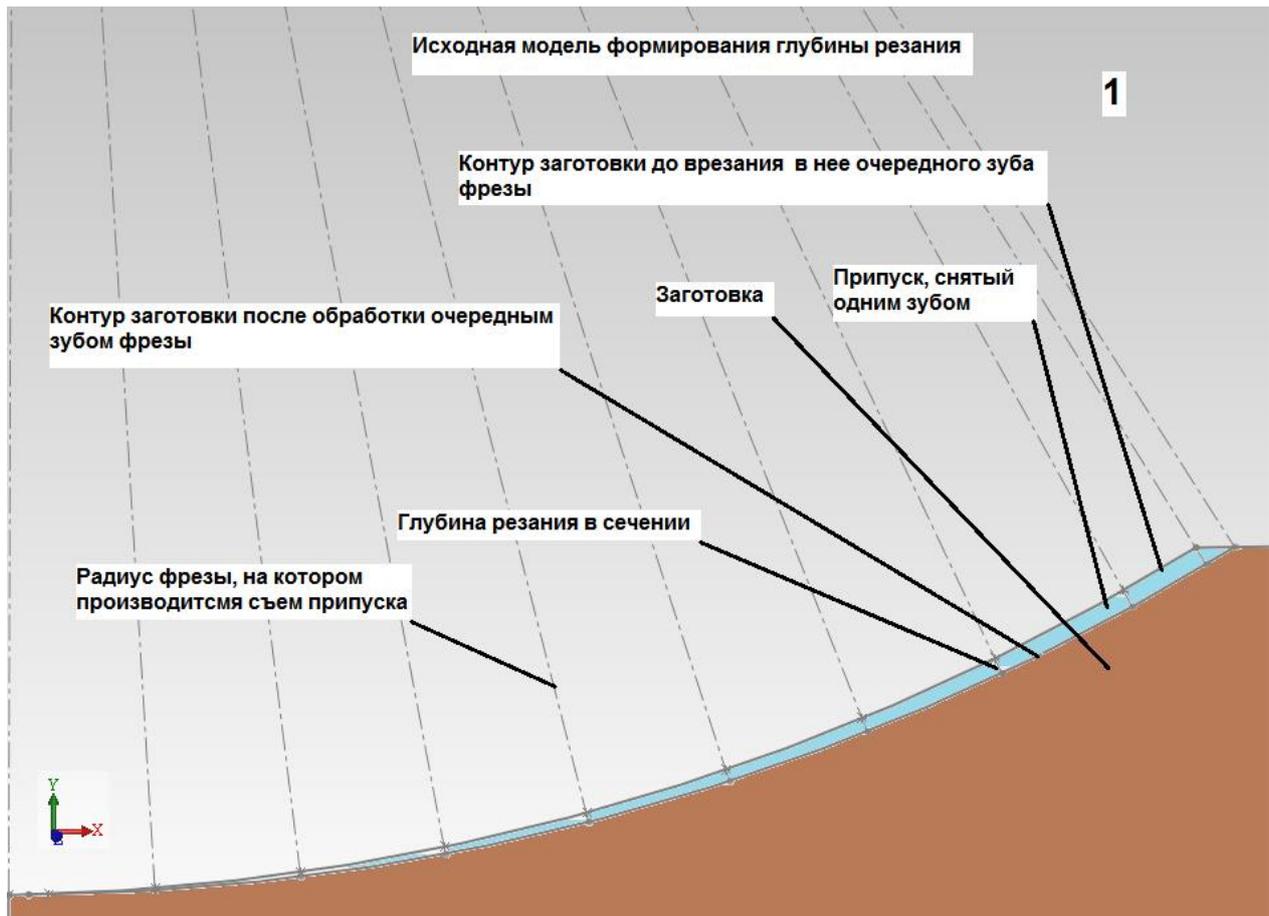


Рис. 6.13. Исходная модель формирования процесса формообразования

Период стойкости T инструмента определяется глубиной резания t , подачей S_o , скоростью V и радиусом округления режущей кромки зубьев фрезы ρ , т.е. параметрами режима резания и условиями формирования с учетом параметра функционального формирования поверхностного слоя при зубофрезеровании $K_p = f(a/\rho, R_z, t_m(k), H, \mu_0, \sigma_0, h, H, \mu)$ и обрабатываемости материала C_v .

Учитывая, что встречное зубофрезерование не стабилно из-за прерывистого характера резания, постоянно изменяющейся толщины срезаемого слоя (a_i) с изменением угла скольжения ($\Psi_{ск}$) согласно зависимости (6.22)

$$a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi, \quad (6.22)$$

где S_z – подача на зуб;

ϕ – угол профиля зуба фрезы в нормальном сечении, определим минимальные значения углов скольжения без СОЖ (6.23) и с ее применением (6.24):

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}; \quad (6.23)$$

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}. \quad (6.24)$$

6.2.2. Моделирование припуска при формообразовании параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес

Для моделирования припуска при формообразовании с последующим получением распределения глубины резания на участке стационарного резания (когда схемы нагружения зуба на предыдущем и последующем резах совпадают) сформируем припуск, снимаемый одним зубом при врезании в заготовку на полную глубину Δ при допущении, что l – й рез зубом фрезы осуществляется в точке D , 0 – й рез осуществляется на расстоянии S_0 от точки D , рис. 6.14 [38].

Уравнение движения вершины зуба фрезы описывается уравнением циклоиды со скольжением:

$$\left. \begin{aligned} x &= K_{ск} \times r \times [t - \sin(t)] \\ y &= r \times [1 - \cos t] \end{aligned} \right\}. \quad (6.25)$$

Коэффициент скольжения при этом

$$K_{ск} = \frac{S_0}{2\pi r}. \quad (6.26)$$

Подставив (6.25) в (6.26), получим

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{S_0}{2\pi} [t - \sin(t)] \\ y &= r[1 - \cos t] \end{aligned} \right\} \quad (6.27)$$

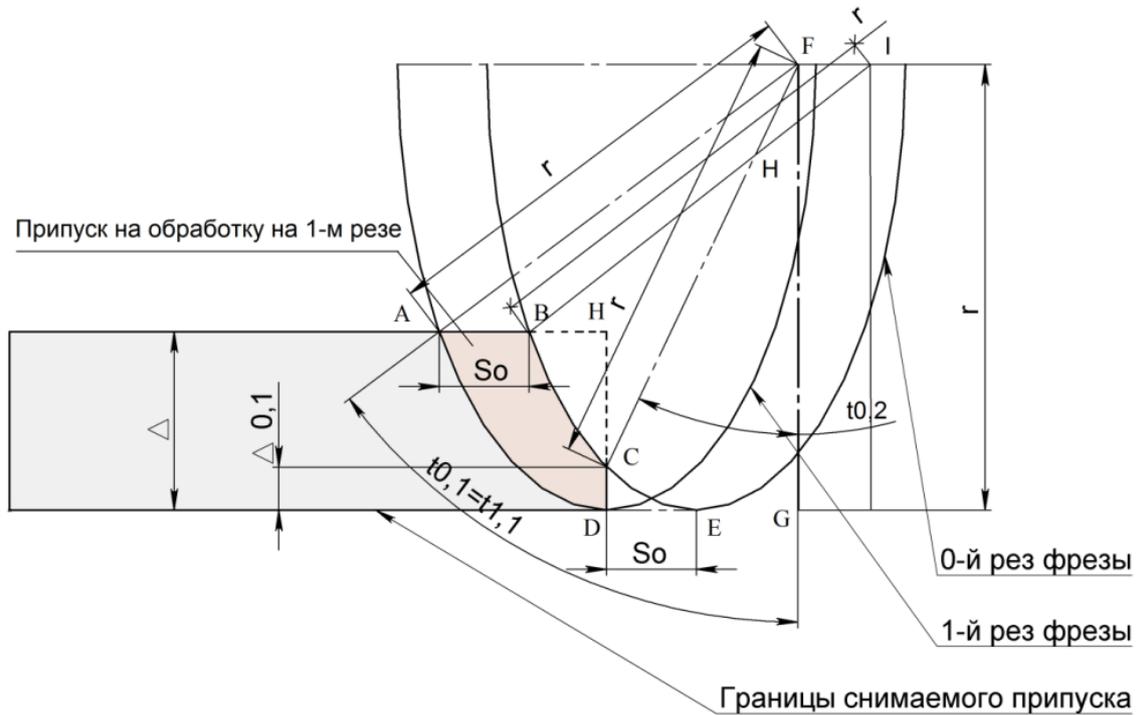


Рис. 6.14. Схема реза зубом фрезы на торце заготовки при встречной подаче: S_0 – подача инструмента на l оборот; r – радиус фрезы; Δ – припуск; $\Delta_{0,1}$ – высота, на которой произошло врезание зуба фрезы в заготовку на 0 – м резе (на l – м резе врезание в заготовку происходит в точке D); $t_{1,1} = t_{0,1}$ – угол выхода фрезы из заготовки на 0 – м и l – м резах; $t_{0,2}$ – угол входа фрезы в заготовку на 0 – м резе

Тогда длина дуги циклоиды (6.25), построенной на угле (t) с радиусом образующей окружности (r) , равна:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} [t - \sin(t)] \right\}^2 + \{r[1 - \cos t]\}^2}. \quad (6.28)$$

Углы $t_{1,1} = t_{0,1}$ могут быть получены из уравнения:

$$y = r[1 - \cos t] \text{ при } y = \Delta \Rightarrow t_{0,1} = \arccos \left(1 - \frac{\Delta}{r} \right). \quad (6.29)$$

По аналогии угол $t_{0,2}$ может быть получен из уравнения:

$$x = 2 \cdot \pi x = \frac{S_0}{2\pi} [t - \sin(t)] \text{ при } x = S_0 \Rightarrow t_{0,2} - \sin(t_{0,2}) = 2\pi.$$

Тогда длина дуги $AD(l_1)$

$$l_1 = \sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} \cdot [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}, \quad (6.30)$$

а для дуги $CE(l_{0,1})$

$$l_{0,1} = \sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} \cdot [t_{0,2} - \sin(t_{0,2})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,2})]\}^2}. \quad (6.31)$$

Так как $AD=BE$, дугу $BC (l_0)$ мы получаем

$$l_0 = l_1 - l_{0,1} = \sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} \cdot [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,1})]\}^2} - \sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} \cdot [t_{0,2} - \sin(t_{0,2})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,2})]\}^2}.$$

Для коллинеальных кривых, какими являются траектории движения зуба фрезы, справедливо $AB=DE$.

Отрезок DC получаем из уравнения

$$DC = \Delta_{0,1} = y = r \cdot [1 - \cos(t_{0,2})]. \quad (6.32)$$

Построим схему изменения глубины резания одним зубом на I – м резе. Для этого преобразуем многоугольник $ABCD$ в прямоугольник вида (рис. 6.15). На схеме (рис. 6.15) точки C и D не меняют своего положения по отношению к расположению на схеме (рис. 6.14).

В то же время точки AI и BI удаляются от первоначального расположения относительно точки H на схеме (рис. 6.14). Это объясняется увеличением длин отрезков DAI и $CB1$.

Глубина резания для единичного зуба на первом резе формируется на перпендикуляре к касательной дуги DA . Это положение позволяет утверждать, что перпендикулярные отрезки прямых $B1B2$ и $CC1$ к отрезку DIA (являются

максимальными значениями глубины резания в точках B и C (рис. 6.14) и могут быть описаны зависимостями (6.33) ÷ (6.35).

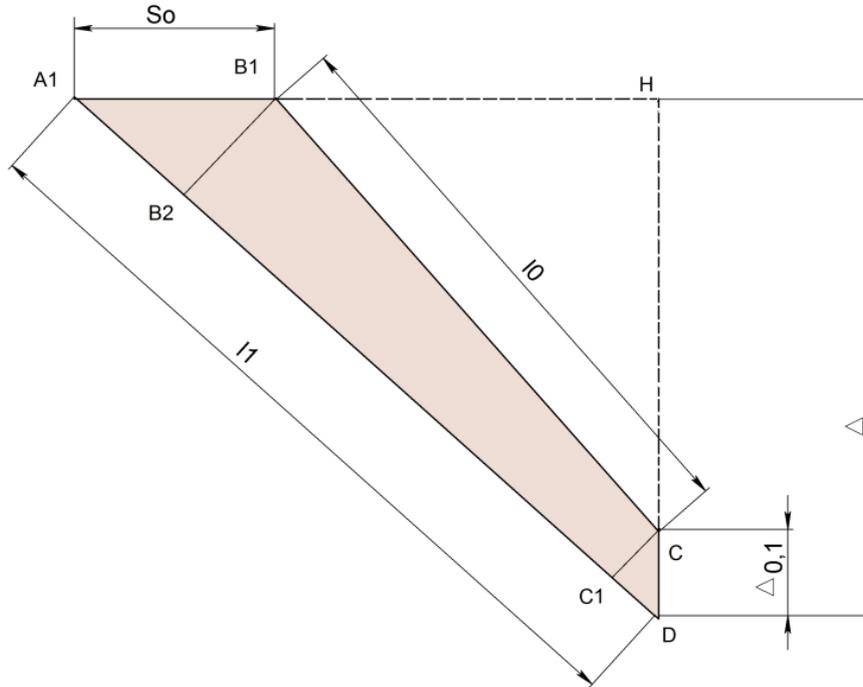


Рис. 6.15. Схема припуска с прямоугольными сторонами эквивалентная схеме (рис. 6.14).

Угол A_1DH с учетом (6.23) равен

$$\angle A_1DH = \arccos\left(\frac{\Delta}{l_1}\right) = \arccos\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\left\{\frac{S_0}{2\pi}[t_{0,1} - \sin(t_{0,1})]\right\}^2 + \{r[1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}}\right). \quad (6.33)$$

Тогда отрезок CC_1 (T_n – начальная глубина резания) равен:

$$CC_1 = T_n = \Delta \times \sin(\angle A_1DH) = \Delta \times \dots \left\{ \arccos\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\left\{\frac{S_0}{2\pi}[t_{0,1} - \sin(t_{0,1})]\right\}^2 + \{r[1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}}\right) \right\}, \quad (6.34)$$

по аналогии отрезок B_2B_1 (T_k – конечная глубина резания)

$$\begin{aligned}
 B_2 B_1 = T_k = \Delta \sin(\angle DA_1 H) = S_0 \cos(\angle A_1 D H) = \dots \\
 \dots = S_0 \cos(\angle A_1 D H) = S_0 \left(\frac{\Delta}{\sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})] \right\}^2 + \left\{ r [1 - \sin(t_{0,1})] \right\}^2}} \right). \quad (6.35)
 \end{aligned}$$

Таким образом, аппроксимируется диаграмма распределения глубины резания при l – м резе на всей длине контакта зуба инструмента с заготовкой, что обеспечивает получение распределения глубины резания на всем участке стационарного резания и является алгоритмом расчета износа немодульных дисковых фрез при скоростном зубофрезеровании.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить оптимальные углы скольжения $\Psi_{ск}$, при которых обеспечивается стабильность процесса зубофрезерования, необходимые условия по стойкости инструмента и качество обрабатываемой поверхности по отношению к наибольшему углу контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемым зубчатым изделием при наивысшей производительности. Соотношение между углом скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшим углом контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса зубообработки через коэффициент функционального формирования поверхностного слоя K_p [82]:

$$K_p = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\%. \quad (6.36)$$

Подставляя в (6.36) технологические параметры обработки, получим, удобное для теоретических и экспериментальных исследований выражение коэффициента эффективности функционального формирования поверхностного слоя K_p (6.37)

$$K_{\rho} = \left(1 - \frac{a \sin \cdot (K_{\text{сож}} \cdot \frac{\rho_i \cdot Z \cdot 10^3 \cdot V}{S_{mi} \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi})}{a \sin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D - H)}}{D}}\right) \cdot 100\%, \quad (6.37)$$

где $K_{\text{сож}} = 0,5$ при обработке без СОЖ, $K_{\text{сож}} = 0,31$ при обработке с СОЖ.

Период стойкости T инструмента определяется из (6.37)

$$T = (C_v)^{1/m} K_{\rho} / (v^{1/m} \cdot S_y^{v/m} \cdot t_x^{v/m}). \quad (6.38)$$

Для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя разрабатана математическая модель с учетом технологических, геометрических параметров и физико-механических свойств, при условии перехода пластического отгеснения материала с обрабатываемой поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя, выраженным через параметр шероховатости R_z [38, 82, 94].

$$\begin{aligned} R_z = 5 \cdot R_a &= \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41} \cdot K_{\rho}^{0,24}} = \dots \\ &= \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot P}\right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H_p^{1/4} \cdot W_p^{1/4}}, \quad (6.39) \end{aligned}$$

где R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, мм;

R_a – средне арифметическое отклонение профиля, мм;

W_z – высота сглаживания профиля волнистости по десяти точкам, мм;

P_z – главная составляющая силы резания, Н;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

a_i – толщина срезаемого слоя, мм;

ρ – радиус округления режущей кромки, мм;

V – скорость резания, м/с;

γ – передний угол фрезы, град.;

K_p – коэффициента эффективности функционального формирования поверхностного слоя;

σ_τ – напряжение текучести;

E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению поверхности зубчатых колес;

I – интенсивность износа зубчатых колес в период нормального износа;

χ – коэффициент, учитывающий параметры опорной кривой;

p – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта;

H_p – высота сглаживания макроотклонения;

W_p – высота сглаживания профиля волнистости;

S_m – средний шаг неровностей;

$k(H_{\mu 0})$ – степень упрочнения.

Уравнение (6.39) адекватно описывает процесс формообразования. Полученные данные используются в качестве технических ограничений по системе параметров поверхностного слоя зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства, при выборе технологических методов и режимов обработки (6.40)

$$\left. \begin{aligned} T_{\min} &\leq T \leq T_{\max}; \\ v_{\min} &\leq v \leq v_{\max}; \\ S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ K_p \min &\leq K_p \leq K_p \max; \\ R_z \min &\leq R_z \leq R_z \max. \end{aligned} \right\} \quad (6.40)$$

Зависимости (6.38), (6.39) используются для технологических параметров формообразования.

Физические величины, входящие в систему (6.40), рассматриваются как математические ожидания соответствующих случайных величин, а само вы-

ражение представляется как многофакторная корреляционная зависимость, справедливая в области существования с определенной точностью и надежностью.

Особое значение имеет информация о частотных свойствах технологического процесса формообразования поверхностного слоя зубчатых колес.

При формообразовании поверхностного слоя одним зубом фрезы моделирование снятия припуска соответствует теоретическим исследованиям процесса формирования припуска (см. рис. 6.16).

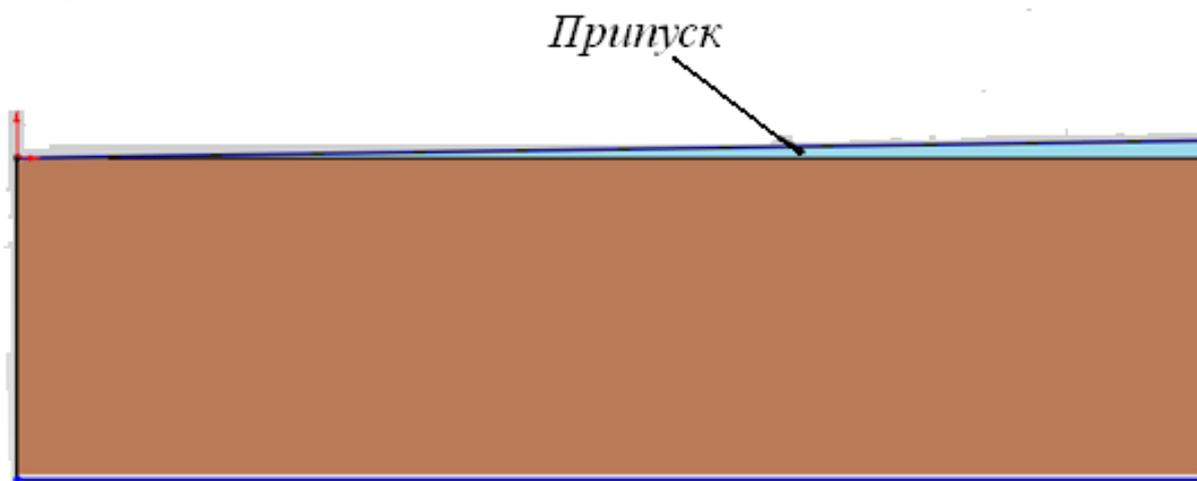


Рис. 6.16. Формообразование поверхностного слоя одним зубом зубообрабатывающей фрезы

При врезании зуб фрезы скользит по обрабатываемой поверхности на угле скольжения $\Psi_{ск}$ (рис. 6.17) при $\alpha_i \ll K_{сож} \cdot \rho$; (рис. 6.18) $\alpha_i < K_{сож} \cdot \rho$ происходит пластическое деформирование поверхностного слоя без снятия припуска; (рис. 6.19) $\alpha_i = K_{сож} \cdot \rho$ – начало процесса стружкообразования на угле скольжения $\Psi_{ск}$, что соответствует началу формирования поверхностного слоя; (рис. 6.20) $\alpha_i > K_{сож} \cdot \rho$ – начало устойчивого процесса стружкообразования с формированием поверхностного слоя в течение времени контактирования зуба фрезы до полного выхода из контакта с обрабатываемой поверхностью на угле Ψ_{max} .

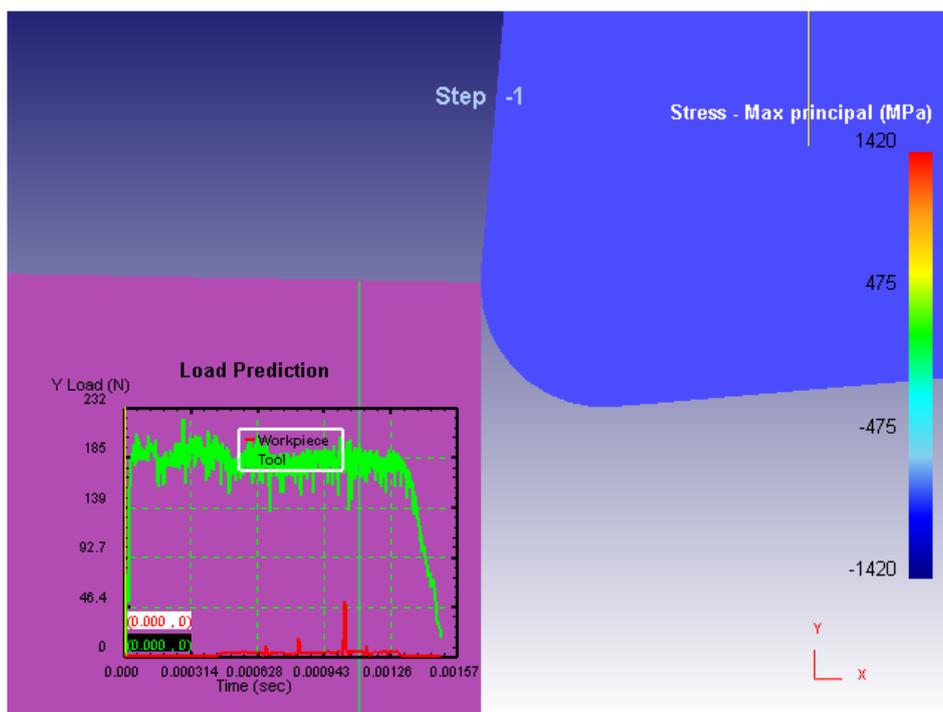


Рис. 6.17. Формирование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i \ll K_{созж} \rho$

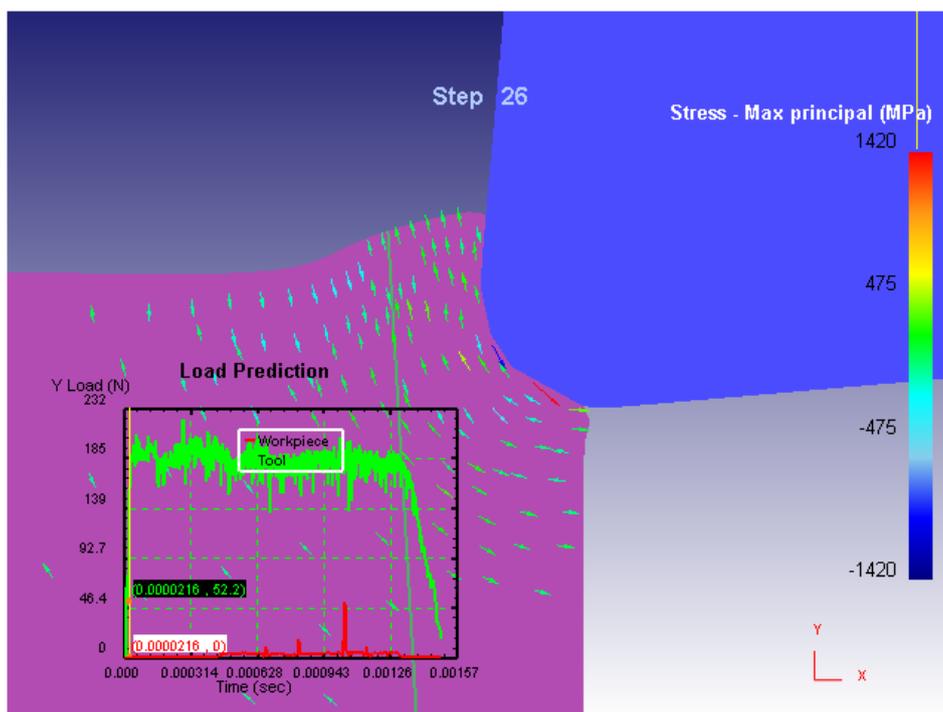


Рис. 6.18. Формирование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i < K_{созж} \rho$

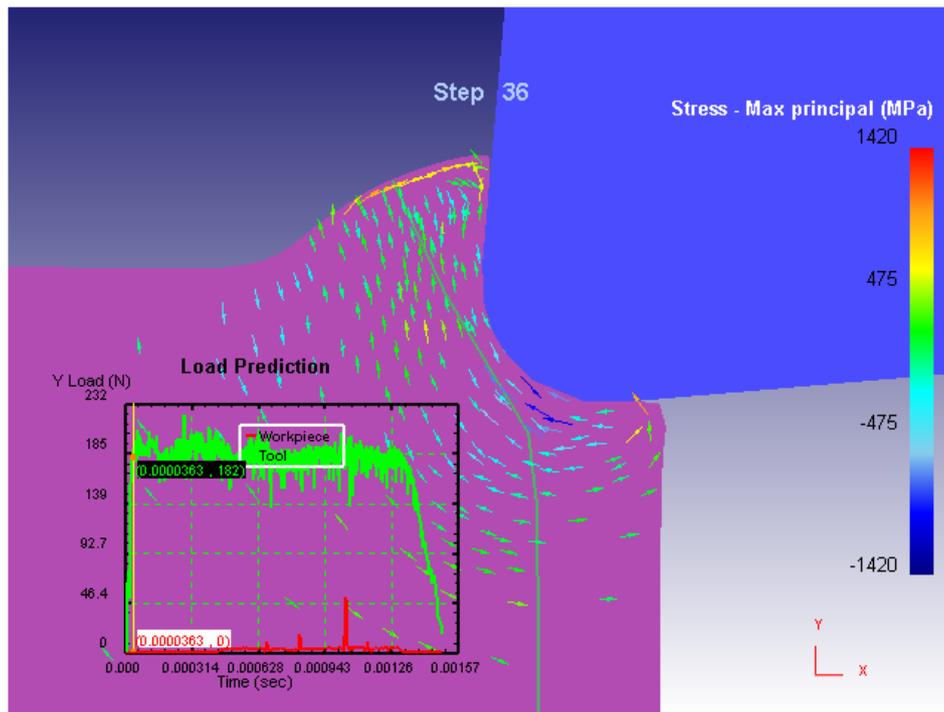


Рис. 6.19. Формирование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i = K_{сож} \cdot \rho$

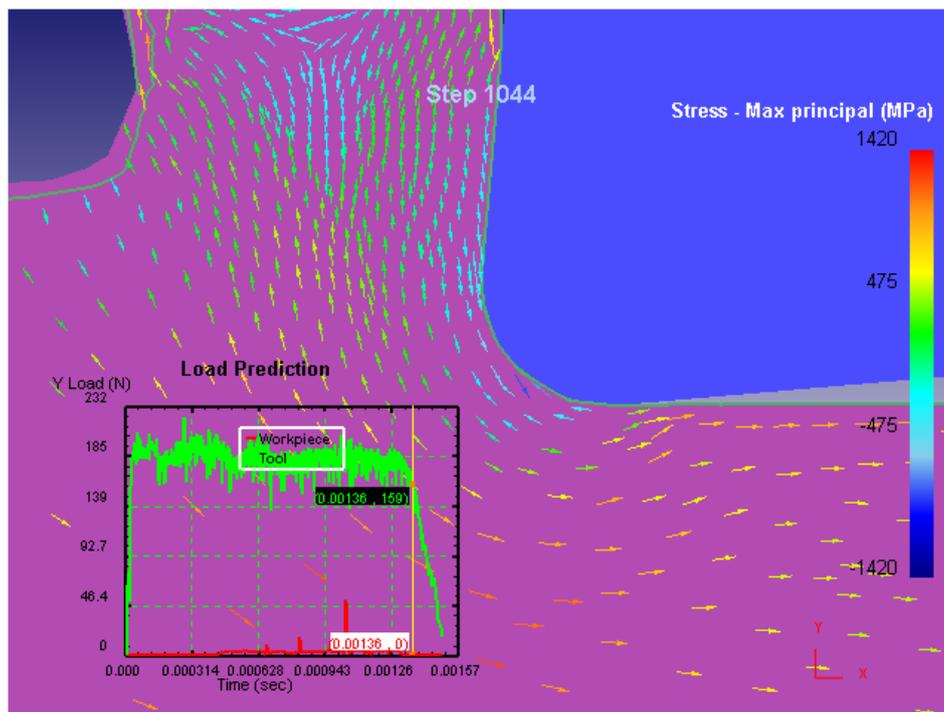


Рис. 6.20. Формирование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы при $\alpha_i > K_{сож} \cdot \rho$

Соотношение углов скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшего угла контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью определяют эффективность процесса формирования поверхностного слоя.

6.2.3. Информационное моделирование технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес

Технологический процесс зубообработки рассматривается как объект управления, состоящий из ряда технологических объектов ($T_{об}$): исходный материал (вход объекта управления); окружающая среда (условия протекания процесса); зубчатое колесо (выход объекта управления, количественная и качественная характеристики поверхностного слоя); модуль обработки с системой управления и технологической оснасткой (собственно объект управления).

Особенности процесса формообразования поверхностного слоя (рис. 6.21) связаны с исходными данными формирования технологических объектов моделирования технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [38, 98].

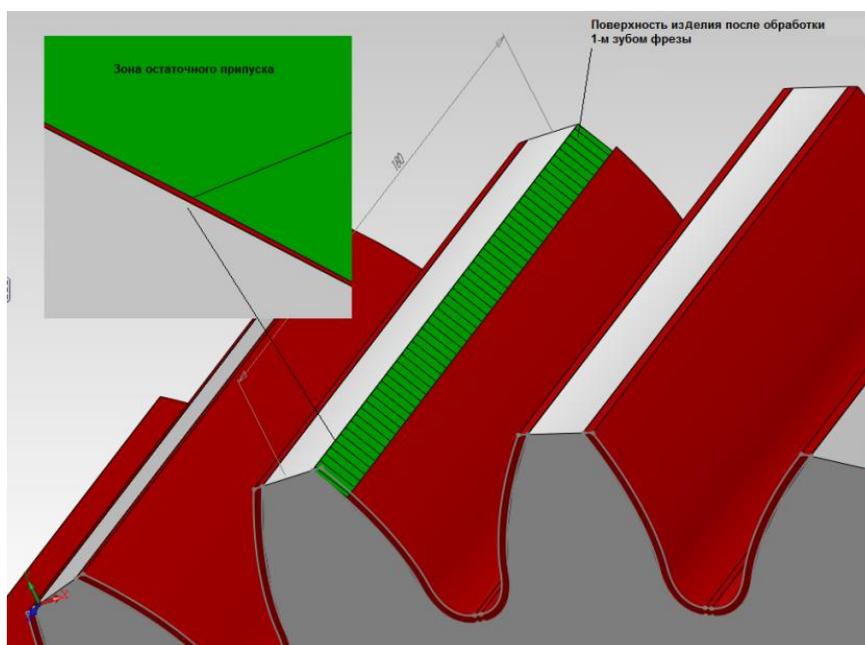


Рис. 6.21. Формообразование поверхностного слоя одним зубом зубообрабатывающей фрезы

Источником информации служит классификация $T_{об}$ моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности (рис. 6.22), целевая функция технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя (рис. 6.23), классификация технических показателей оптимальности при зубообработке (рис. 6.24).

Задача оптимального управления зубообработкой формулируется как задача выбора формообразования, который обеспечивает максимальную производительность с обеспечением качественного поверхностного слоя закаленных зубчатых колес при заданной точности с учетом показателя себестоимости.

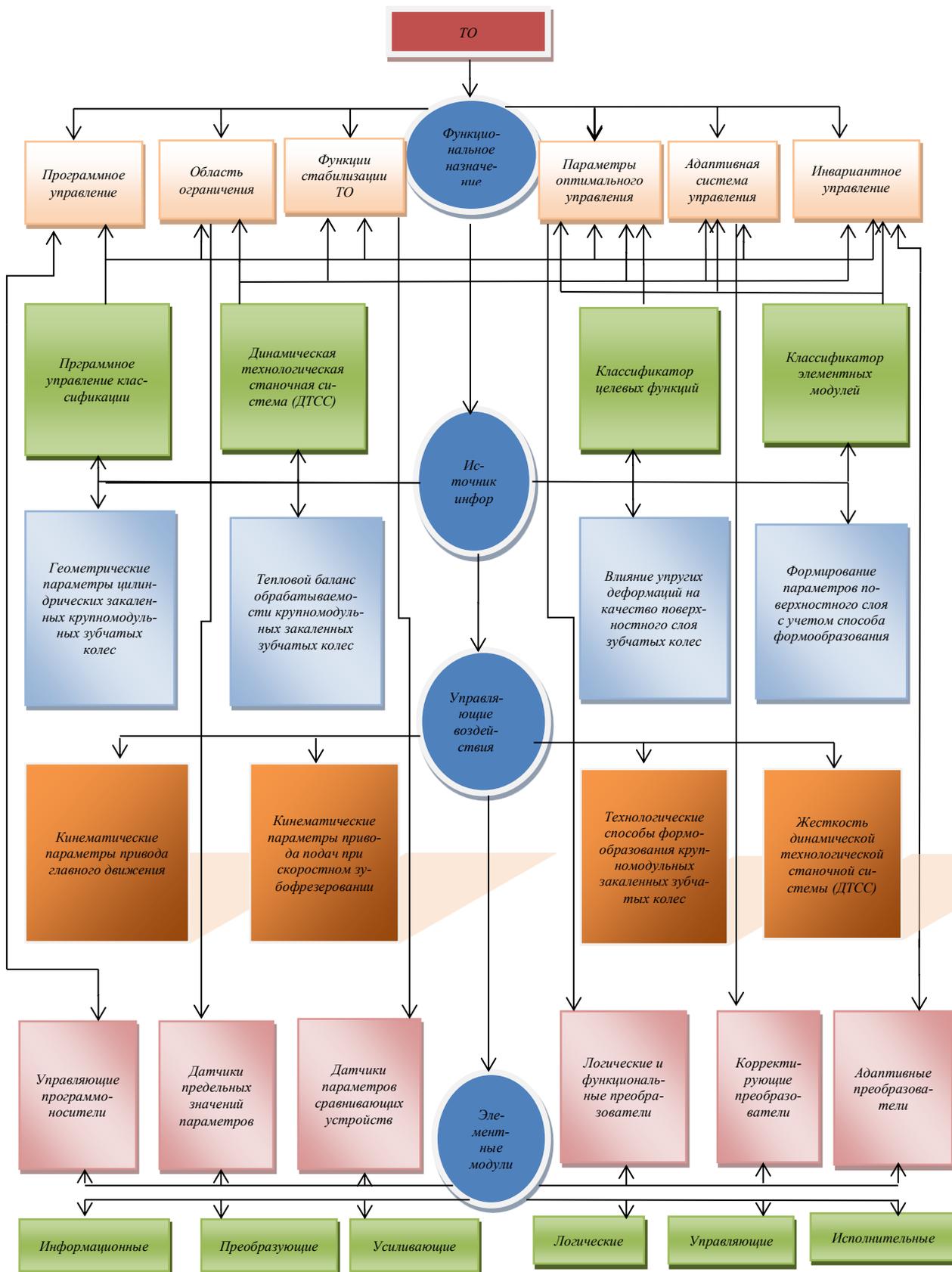


Рис. 6.22. Классификация $T_{Об}$ моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес

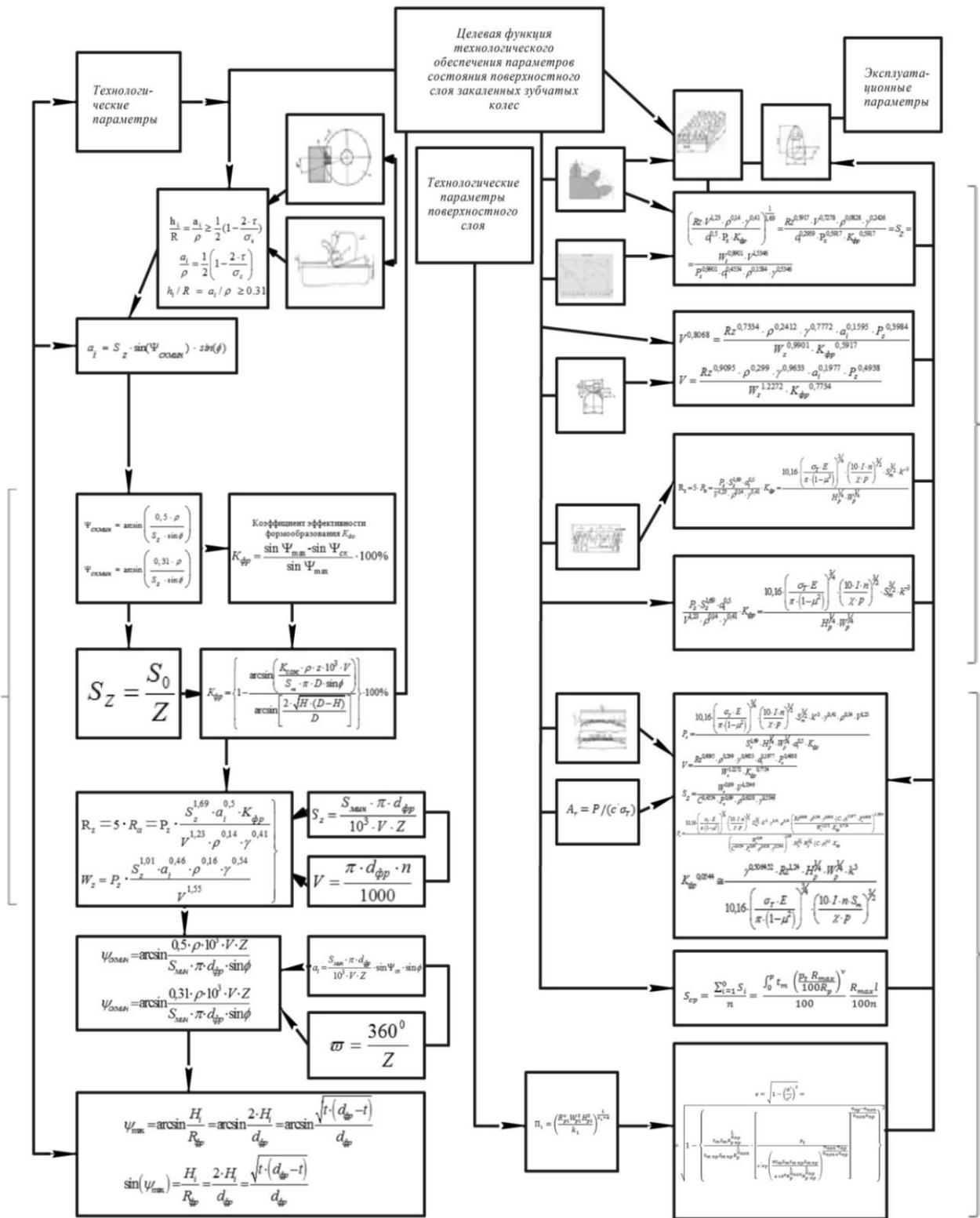


Рис. 6.23. Целевая функция технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес

Решение оптимального управления процессом зубообработки интегрируется в совместном рассмотрении целевых функций технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя и техническими по-

казателями оптимальности при зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес.

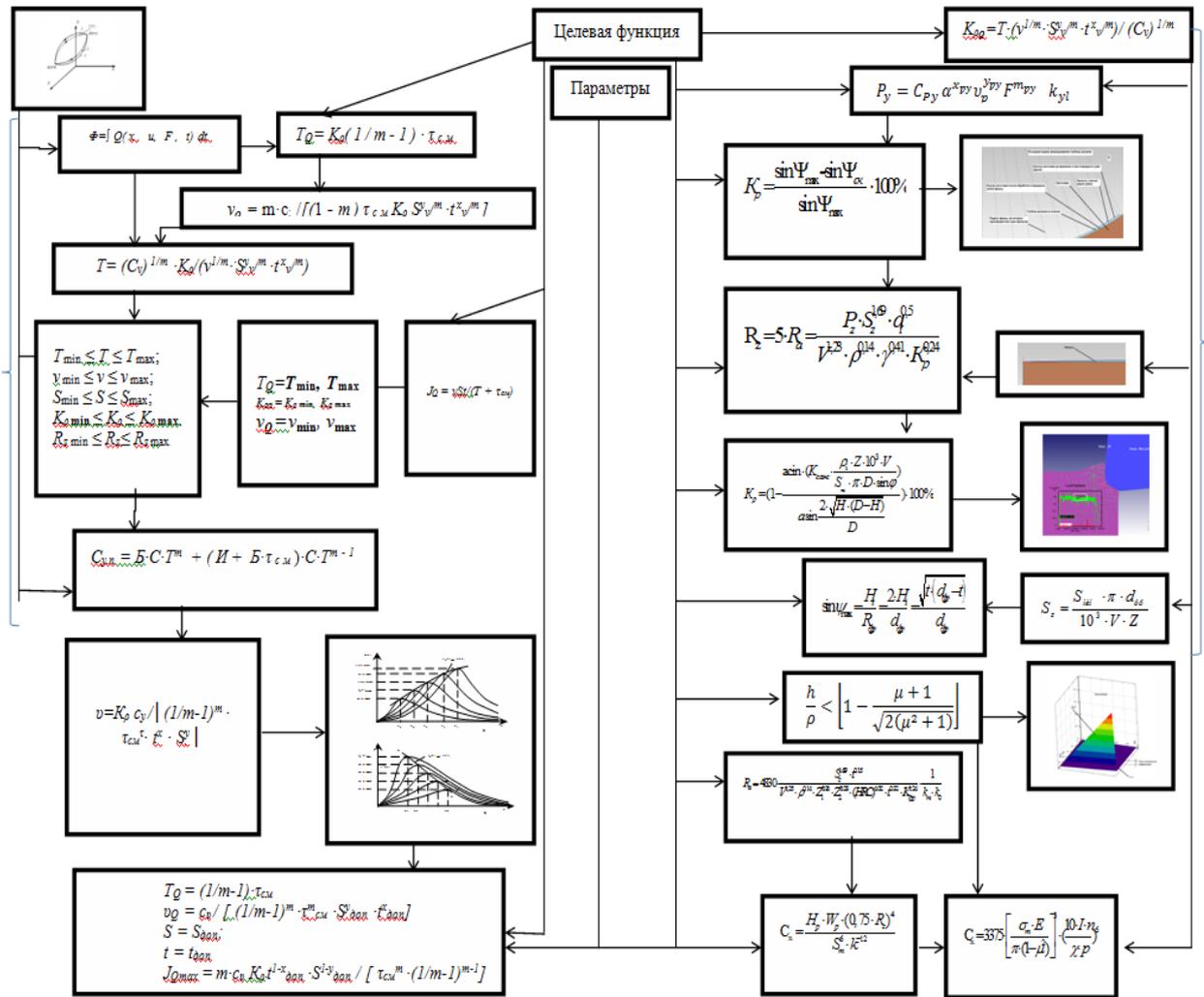


Рис. 6.24. Классификация технических показателей оптимальности при зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес

Оптимальные сочетания целевых функций технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес находятся в области оптимального управления. Построение области оптимального управления и формирует стратегию управления и моделирование оптимального управления зубообработкой закаленных крупномодульных зубчатых колес.

6.2.4. Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес при помощи системной оптимизации

Одной из главных задач в области станкостроения и машиностроения является значительное улучшение качества выпускаемых станков и машин, оборудования и приборов, повышение их технического уровня, производительности и надежности.



Рис. 6.25. Состояние активных поверхностей зубьев при наличии прогрессирующего выкрашивания

Поэтому для повышения качества передач важно обеспечить технологически систему геометрических (параметры макроотклонения, волнистости, шероховатости), физико – механических и комплексных параметров их состояния. Эта система параметров характеризует эксплуатационные свойства при помощи комплексных параметров состояния по-

верхности с целью предупреждения выхода зубчатых передач из строя, таких, как поломка зубьев, выкрашивание активных поверхностей (рис. 6.25) и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев (рис. 6.26) и заедание [97].

Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию может быть достигнуто: обеспечением равномерного контактного слоя и шероховатости эвольвентной поверхности путем формообразования поверхностного слоя инструментом, имеющим радиус округления режущей кромки при минимальном угле скольжения зуба фрезы.

Существенное влияние на износ оказывает шероховатость рабочих поверхностей зубьев. Если микронеровности на активных поверхностях зубьев

превышают толщину масляного слоя, то происходит непосредственное соприкосновение активных поверхностей зубьев.

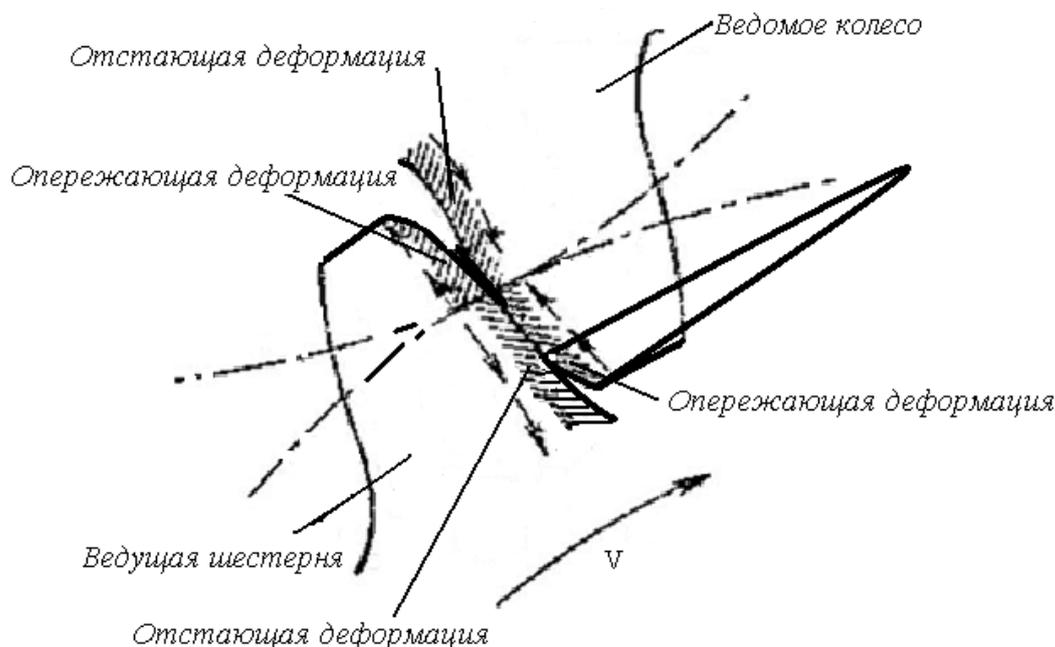


Рис. 6.26. Схема пластической деформации активных поверхностей зубьев

Интенсивный начальный износ называется приработочным износом. По мере сглаживания поверхностей зубьев износ уменьшается и может совсем прекратиться. Продолжительность приработочного износа существенно зависит от твердости активных поверхностей зубьев, которые влияют на расчетную величину комплексного параметра состояния поверхности. Для передач с высокой твердостью этот процесс может быть весьма длительным. В тех случаях, когда износ стабилизируется во времени, он носит название прогрессирующего. Этот износ характерен для открытых зубчатых передач или передач, работающих без смазки, и является основной причиной выхода их из строя.

В зоне контакта, где материал подвергается сильному всестороннему сжатию, возникают пластические деформации зубьев. Силы трения вызывают перемещение поверхностных слоев материала в направлении вектора скорости скольжения. При этом на поверхности ведущих зубьев вблизи полюс-

ной линии образуется впадина, на поверхности ведомых зубьев – выступ (рис. 6.26), что в значительной степени определяется значением коэффициента трения сопрягаемых эвольвентных поверхностей зубчатых колес и их состоянием.

Между пределом прочности σ_B (МПа) и твердостью HB или HRC существует приближенная зависимость

$$\sigma_B = 3,5HB \approx 35HRC. \quad (6.41)$$

При решении рассматриваемой задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых передач применяются комплексные параметры равновесного состояния поверхности.

Поэтому выделяются два вида таких параметров – технологические и расчетно-конструкторские. Их формальные значения выводятся из условий эксплуатации.

Считается, что для технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных зубчатых колес необходимо, чтобы конструкторско-расчетное значение параметра было меньше либо равным его технологическому значению. Это условие положено в разработанную методику моделирования.

С разделением комплексных параметров на технологические и расчетно-конструкторские возникает задача упрощения регламентации, единства подхода и снижения вероятности ошибок технологических решений. Один из вариантов такого решения это применение графических методов системной оптимизации.

При таком двухступенчатом технологическом обеспечении, где разделены задачи конструктора и технолога, критериями по определению метода обработки на финишном этапе, а также и режимов резания являются необходимые условия максимума площадей эффективного значения эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки ОЭМО (СОЭМО), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности

распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметров качества поверхности [38].

На рис. 6.27 показана зависимость регламентируемого комплексного параметра при обеспечении заданного эксплуатационного свойства K_x от регламентируемого параметра качества поверхности R_a , что в пределах одного этапа обработки, в зависимости от выбранного метода, как например – чистовое зубофрезерование червячной модульной фрезой, зубошлифование и скоростное зубофрезерование немодульными дисковыми фрезами, вероятность обеспечения заданного эксплуатационного свойства составляет 66 % и 46 % соответственно (комплексный параметр K_x).

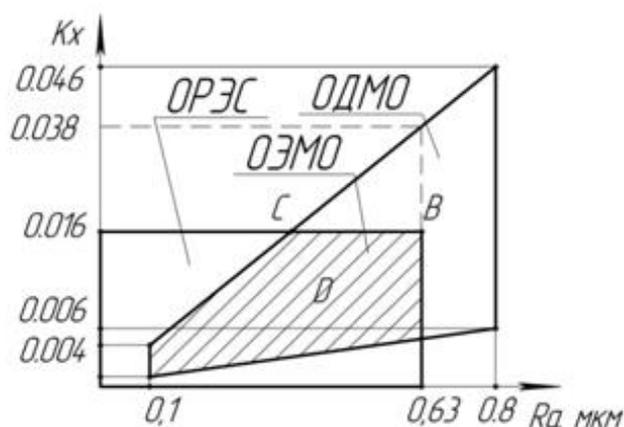


Рис. 6.27. Схема выбора метода зубообработки:

ОДМО – область достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область D);

ОРЭС – область регламентируемых значений эксплуатационных свойств (область P);

ОЭМО – область эффективных значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область A);

R_a – регламентируемый параметр качества поверхности;

K_x – регламентируемый комплексный параметр при обеспечении заданного эксплуатационного свойства

Это однозначно говорит о приоритете скоростного зубофрезерования немодульными дисковыми фрезами (рис. 6.28) над всеми остальными рассмотренными методами обработки при обеспечении эксплуатационных

свойств – исключение поломки зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание, при отвлечении от учета затрат.

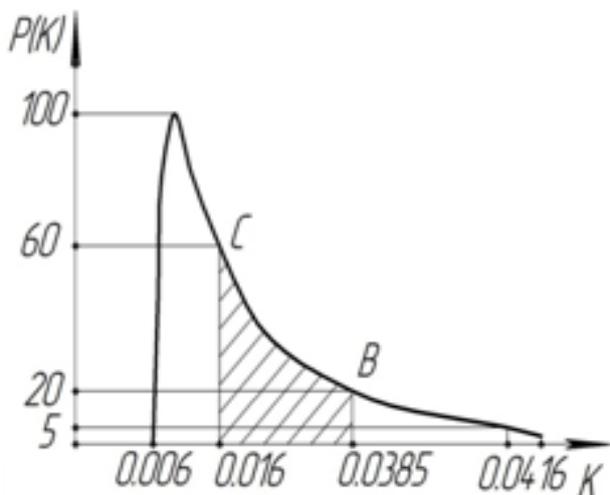


Рис. 6.28. Функция плотности вероятности $\Phi(K_x)$ при скоростном зубофрезеровании с обеспечением эксплуатационного свойства:

$P(K)$ безразмерная величина от 0 до 100, зависящая от K в интервале значений от 0,006 до 0,0416

тации (рис. 6.29).

Рассматривая рис. 6.28 и рис. 6.30 можно сказать, что выходной информацией конструктора и в то же время исходными данными для технолога служит область регламентируемых значений эксплуатационных свойств ОРЭС (ЦОРЭС). Эта область включает все эксплуатационные свойства, которые конструктор задал технологу.

Процесс моделирования заключается в установлении наложений областей достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки ОДМО (СОДМО) и рассмотренной выше областью (ЦОРЭС). Где СОДМО – совместная область достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область В);

При невыполнении одного или нескольких из этих условий следует либо сменить метод обработки на финишном этапе технологического процесса, либо сменить регламентируемые параметры качества поверхности, либо увеличить число этапов обработки поверхности.

Если же это не дало желаемого результата, то можно пересмотреть перечень регламентируемых эксплуатационных свойств и выбрать из них те, которые являются доминирующими для рассматриваемых условий эксплуата-

ЦОРЭС – целевая область регламентируемых значений эксплуатационных свойств (область P); СОЭМО – совместная область эффективных значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе зубообработки (область A) [38].

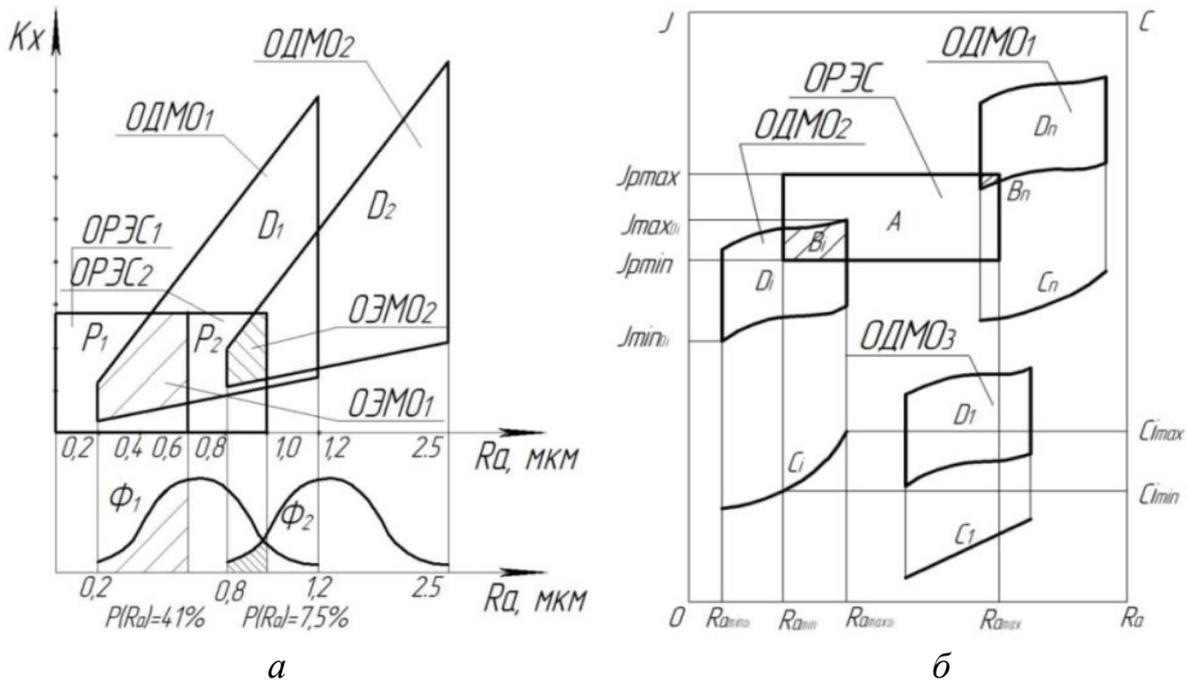


Рис. 6.29 Замена метода обработки при обеспечении заданного эксплуатационного свойства:

a – неудовлетворительного значения плотности вероятности $P(R_a)$;

b – неудовлетворительной величине затрат C_3 ;

C_n – площадь и положение области $OЭМО_i$; определяют значение плотности распределения комплексного параметра состояния поверхности K_x ;

C_9 – площадь и положение пересечения областей $OPЭC_i$ и $ODMO_i$; в проекции на функцию C_i определяют диапазон затрат при обеспечении эксплуатационных свойств поверхности;

C_i – величина издержек при рассматриваемом методе обработки зависит от проекции границ области A_{ij} на функцию затрат; область ЦОРЭС включает все эксплуатационные свойства заданные для обеспечения, ее пересечение с областью СОДМО определит размер площади области СОЭМО и ограничит диапазон параметров поверхностного слоя, необходимых для технологического обеспечения

В то же время, ограничением возможности применения данного моделирования является следующее: область ОРЭС (ЦОРЭС) ограничена возможностями разработчика и назначение любого значения регламентации внутри нее

является величиной равновероятной, а также для ряда эксплуатационных свойств зубчатых колес: исключения поломки зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание имеют не постоянную площадь контакта, для которых выделить период нормального износа сложно, что говорит о невозможности построить область ОРЭС (ЦОРЭС), т.к. комплексный параметр будет постоянно изменяться в процессе эксплуатации.

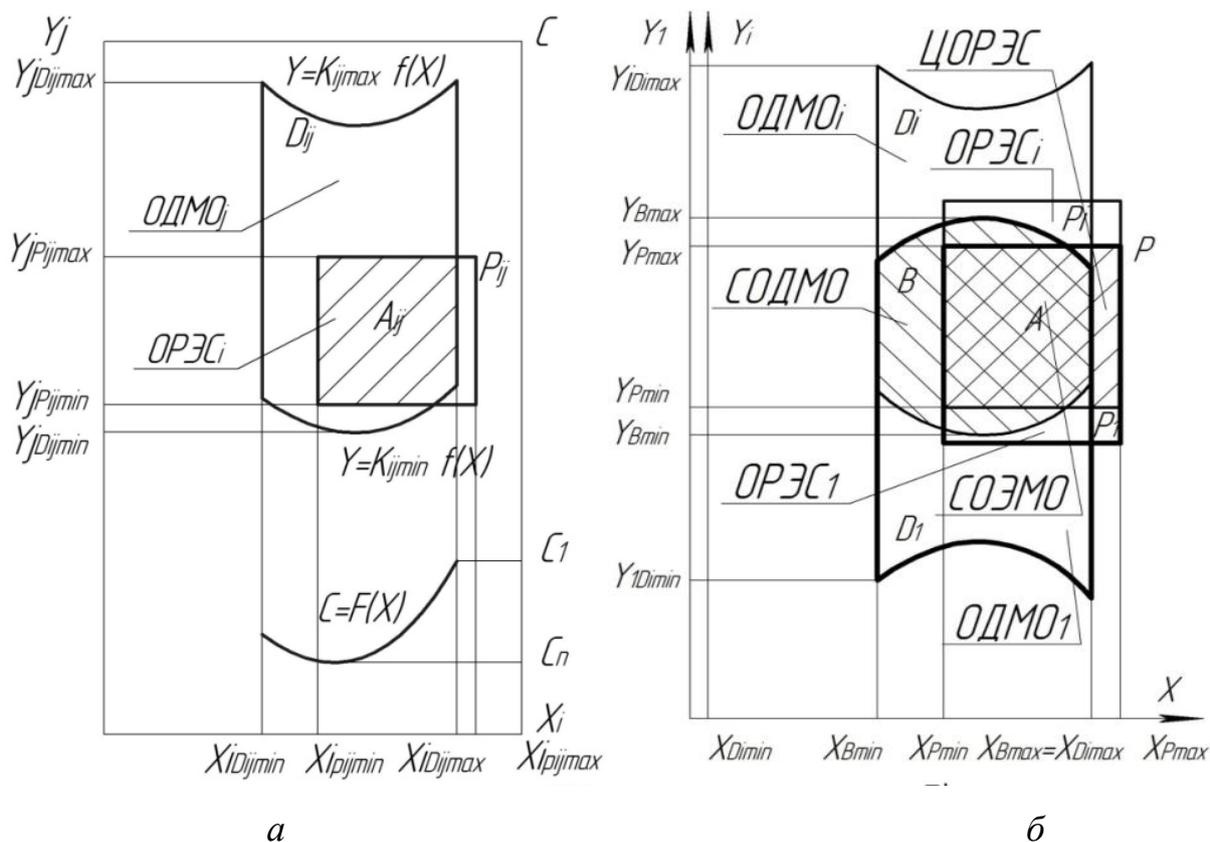


Рис. 6.30. Графическая схема выбора метода обработки:

а – одного эксплуатационного свойства и оптимальной величины затрат C_i ;

б – нескольких эксплуатационных свойств

6.3. Моделирование взаимосвязей технологического воздействия при зубообработке и качества зубчатого зацепления крупномодульных колес

6.3.1. Методика выбора и назначения технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

При изготовлении цилиндрических зубчатых колес, работающих при высоких знакопеременных нагрузках в условиях высоких контактных напряжений, требуется выдерживать заданные параметры качества поверхностного слоя, в частности, шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, остаточные напряжения. На основании обобщенных теоретических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь критериев качества поверхностного слоя с технологическими параметрами процесса резания, разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес червячными модульными и специальными немодульными фрезами при скоростном зубофрезеровании. Методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое позволяет назначать режимы резания исходя из требуемой величины шероховатости, глубины наклепа, уровня остаточных напряжений.

Расчет остаточных напряжений, обусловленных структурными и фазовыми превращениями, основывается на расчете температурных остаточных напряжений и остаточных напряжений, обусловленных силовым воздействием на поверхностный слой. Поскольку остаточные напряжения являются упругими, для сложения упругих остаточных напряжений используется метод наложения: суммарные остаточные напряжения определяются алгебраическим суммированием температурных и силовых остаточных напряжений. Для того чтобы определить остаточные напряжения от каждого фактора в отдельности, необходимо установить закономерность распределения темпера-

туры в поверхностном слое обрабатываемых цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, а также определить усилия резания, действующие на обрабатываемую поверхность.

В (6.42) – (6.46) приведен расчет температурных остаточных напряжений при обработке цилиндрических крупномодульных зубчатых колес червячными модульными и специальными немодульными фрезами при скоростном зубофрезеровании [38].

$$\sigma_{ост.м} = -\sigma_T + \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_1} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1 + x_2) H} \right\}, \quad (6.42)$$

при $y = y_{он}$; $\sigma_{0max} < 2\sigma_T$.

$$\sigma_{ост.м} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \leq \dots$$

$$\dots \leq \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y)^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + (1 - \mu) \sigma_T (H - y_{он})}{E_D y_{он}} + \dots \right. \quad (6.43)$$

$$\left. \dots + \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1 + x_2) H} \right\},$$

при $y < y_{он}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T$.

$$\sigma_{ост.м} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \leq \dots$$

$$\dots \leq \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y)^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + (1 - \mu) \sigma_T (H - y_{он})}{E_D y_{он}} + \dots \right. \quad (6.44)$$

$$\left. \dots + \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1 + x_2) H} \right\},$$

при $\sigma_{ост.м} = c$; $y = y_{он}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T$.

$$\sigma_{ocm.m} = -\sigma_m + \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \times \dots$$

$$\dots \times \left\{ \dots + \frac{\left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \dots}{\dots + \frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{00})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right]} + \dots \right\},$$

$$\dots \times \left\{ \dots + \frac{2(1 - \mu)\sigma_T (H - y_{00})}{E_D y_{00}} \right\},$$
(6.45)

$$\text{при} \begin{cases} y_{00} > y \geq y_{он}; \\ \sigma_{0max} = 2\sigma_T \end{cases};$$

$$\sigma_{ocm.m} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \times \dots$$

$$\dots \times \left\{ \dots + \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{00})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right]}{E_D y_{00}} + \dots \right\}$$

$$\dots \times \left\{ \dots + \frac{2(1 - \mu)\sigma_T (H - y_{00})}{E_D y_{00}} - \dots \right\}$$

$$\dots \times \left\{ \dots - \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H - a_1 - y_{он})^{1+x_2} - (H - a_1)^{1+x_2} \right]}{E_D y_{он}} - \dots \right\}$$

$$\dots \times \left\{ \dots - \frac{(1 - \mu)\sigma_T (H - y_{00})}{E_D y_{он}} \right\},$$
(6.46)

$$\text{при} \begin{cases} y < y_{он} \\ \sigma_{0max} = 2\sigma_T \end{cases},$$

где H – твердость поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, HRC ; $\sigma_{ocm.T}$ – напряжения на поверхности при охлаждении; y – глубина залегания рассматриваемого слоя от поверхности; $y_{он}$, y_{00} – границы раздела упругих и пластических деформаций при нагревании и пластических деформаций при нагревании и охлаждении; σ_T и E_D – предел теку-

чести и модуль упругости обрабатываемого материала; β_n и μ – коэффициент температурного линейного расширения и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала; A_1 и X_2 – величины, определяющие значение температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали; a_i – переменная толщина среза при встречном зубофрезеровании; $a_i = S_z \cdot \sin \Psi \cdot \sin \varphi$; S_z – подача на зуб; φ – угол профиля зуба фрезы.

Остаточные напряжения, обусловленные силовым воздействием на поверхностный слой, определяются в соответствии с теоремой Генки о разгрузке как разность напряжений, возникающих при нагружении $\sigma_{\phi НКТ}$ и разгрузке $\sigma_{Н\beta\tau}$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_1 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}, \\ \sigma_y &= -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_2 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}, \\ \sigma_{xy} &= \frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_3 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_3 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}. \end{aligned} \right\}, \quad (6.47)$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу;

b_i – ширина среза;

b – периметр рабочих частей режущих кромок;

Δ – длина площадки контакта задней поверхности фрезы с обрабатываемой поверхностью;

Δ_1 – проекция поверхности сдвига на горизонтальную плоскость;

h – глубина залегания опережающих пластических деформаций в поверхностном слое;

B – критерий, характеризующий угол схода стружки;

α и γ – задний и передний углы фрезы.

Истинные напряжения определяются также по формулам (6.47) при условии, что y соответствует глубине залегания пластических деформаций. Условие пластичности определяется по теории Хубера – Мизеса.

При анализе шероховатости обработанной поверхности на формирование неровностей при встречном фрезеровании учитывается радиус округления режущей кромки зубьев фрезы ρ , параметры инструмента, изменяемая во времени геометрия сечения среза $a_i = S_z \cdot \sin \Psi \cdot \sin \varphi$, объем и скорость пластического деформирования металла, обусловленные комплексом температурно-силовых явлений, возникающих в зоне резания (рис. 6.31). С учетом этого

$$R_z = \left\{ \frac{a_i^{0,125} b_1^{0,7} c_\rho \theta \rho^{0,1} a^{0,43} \left[2,85 \sin^{0,115} \alpha V^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda \rho^{0,57} \rho^{0,075} \right]}{V \lambda \sin^{0,165} \alpha} \right. \\ \left. -0,5 \tau \rho \cdot b \left[\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 B^{1 - b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho} \right] \cos \alpha \right\} \frac{1}{K_\rho}, \quad (6.48)$$

$$\left. \frac{\tau \rho \left[1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} B - \gamma) \right]}{\rho} \right\}$$

где K_ρ – коэффициент эффективности формообразования поверхностного слоя;

c_ρ – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала;

θ – температура в зоне резания;

ρ_i – радиус округления режущей кромки фрезы;

t – глубина резания;

δ – длина площадки износа по задней поверхности фрезы;

α – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала;

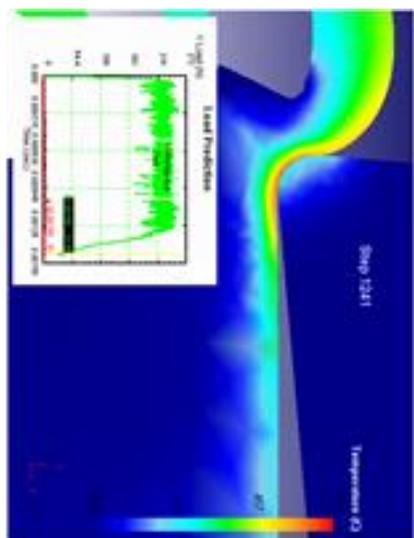
V – скорость резания;

λ и λ_ρ – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов;

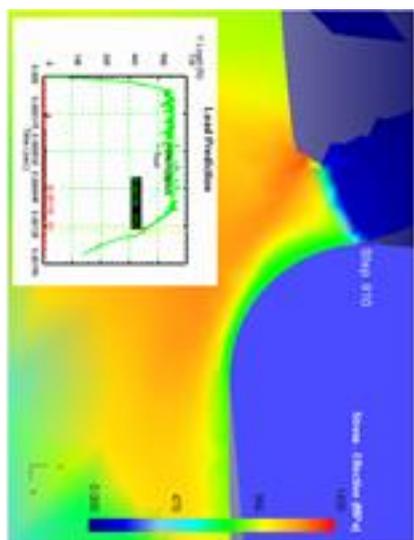
φ – угол исходного профиля 20° ;

α_1 и α_2 – величины, зависящие от условий обработки (угла схода стружки).

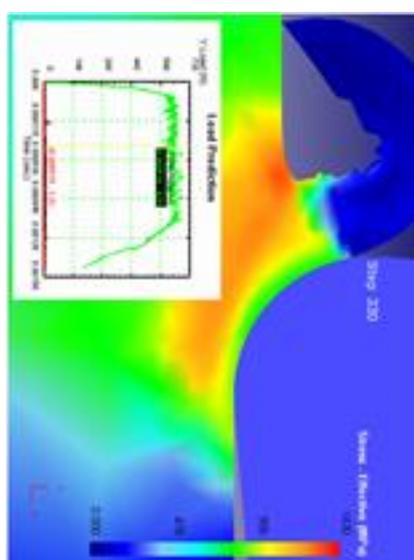
Глубина наклепа обработанной поверхности h_c принимается равной глубине залегания пластических деформаций. Возникновение пластических деформаций в поверхностном слое обусловлено одновременным воздействием силового и температурного факторов [38, 93].



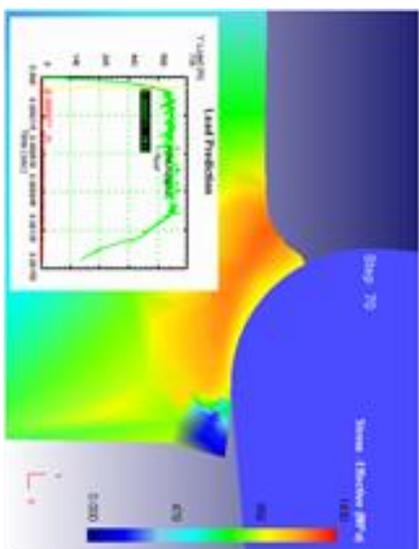
$$\psi_{ск} = 24^{\circ}43'$$



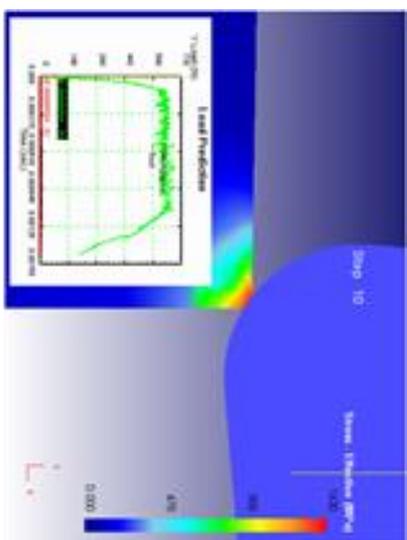
$$\psi_{ск} = 22^{\circ}44'$$



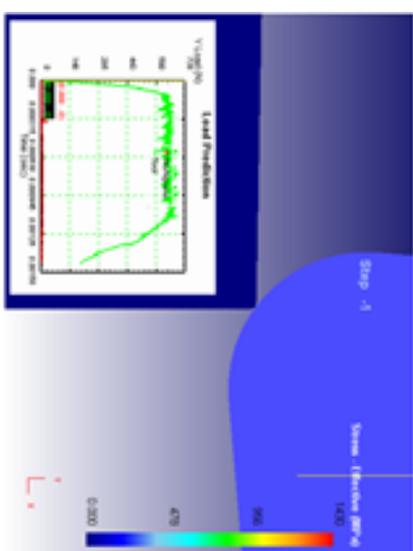
$$\psi_{ск} = 19^{\circ}11'$$



$$\psi_{ск} = 6^{\circ}35'$$



$$\psi_{ск} = 0^{\circ}54'$$



$$\psi_{ск} = 0^{\circ}$$

Рис. 6.31. Последовательность моделирования формообразования глубины залегания остаточных напряжений поверхностного слоя h_s и схода стружки при скоростном зубофрезеровании ($\rho = 0,300$ мм) в зависимости от угла скольжения $\psi_{ск}$

При обработке конструкционных и легированных закаленных сталей (42...56HRC) степень наклепа с достаточной для практических целей точностью

$$N = \frac{h_c}{1,25 \cdot \left(\frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{вл}} \right)^{0,8}} \cdot 100\%, \quad (6.49)$$

где σ_{σ} – предел прочности обрабатываемого материала;

$\sigma_{вл}$ – предел прочности легированных сталей цилиндрических зубчатых колес.

Методика выбора, назначения, технологического и метрологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес показывает, что эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес в значительной степени определяются системой параметров их поверхностного слоя.

Таким образом, технологическое обеспечение эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес в настоящее время определяется решением двух задач: выбором материала цилиндрических зубчатых колес и обоснованием назначения точности размеров и системы параметров состояния поверхностного слоя, которые обеспечивали бы требуемые эксплуатационные свойства; выбором метода и установления рациональных режимов обработки, обеспечивающих наиболее экономичное получение заданной точности размеров и системы параметров состояния поверхностного слоя обрабатываемых цилиндрических зубчатых колес.

6.3.2. Выбор и назначение метрологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства

Для обеспечения плавности зубчатых передач необходимо получить

предельные отклонения шага зацепления (рис. 6.32) в соответствии с требованиями ГОСТ1643 – 81; шумовые характеристики высокоскоростных тяжело нагруженных цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес в передачах определяются погрешностью профиля зуба (рис. 6.33); параметры износостойкости зубчатых передач, долговечности обеспечиваются параметрами отклонения допуска на направления зуба F_β (рис. 6.34) [38, 94].

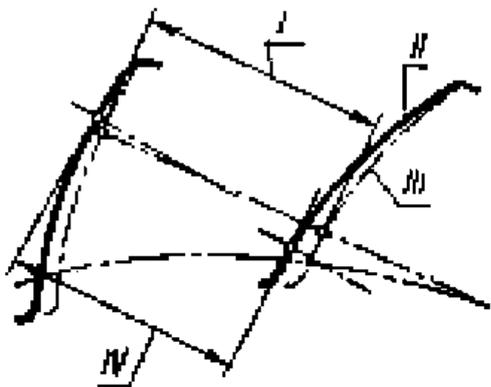


Рис. 6.32. Предельные отклонения шага зацепления:
 верхнее отклонение – $+f_{pb}$;
 нижнее отклонение – $-f_{pb}$;
 I – номинальный шаг зацепления;
 II – действительный профиль зуба;
 III – номинальный профиль зуба;
 IV – действительный номинальный шаг



Рис. 6.33. Погрешность профиля зуба:
 I – действительный торцовый профиль зуба;
 II – номинальные торцовые профили зуба;
 III – основаня окружность;
 IV – границы активного профиля зуба

Структурная схема решения задачи показана на рис. 6.35. На основе совместного анализа условий нормальной эксплуатации (блок 1) и технических условий на изготовления цилиндрических зубчатых колес (блок 2) осуществляется определение требуемых эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес и допустимых пределов их изменения (блок 3).

Например, если суммарное сближение сопрягаемых поверхностей под нагрузкой при трении-скольжении за весь срок их службы не должно превы-

шать 16 – 20 мкм, а величина контактного сближения поверхностей под нагрузкой за счет пластических и упругих деформаций их поверхностных слоев составляет 5 – 6 мкм, то это значит, что износ сопрягаемых цилиндрических зубчатых колес за весь срок их службы не должен превышать 10 – 14 мкм. Зная срок службы тяжелых токарных станков с ЧПУ и вычислив фактическое время работы рассматриваемого зубчатого узла за весь срок службы T , допустимая интенсивность изнашивания зубчатой пары определяется по формуле: $J = (10 \dots 14)/T$, мкм/с.

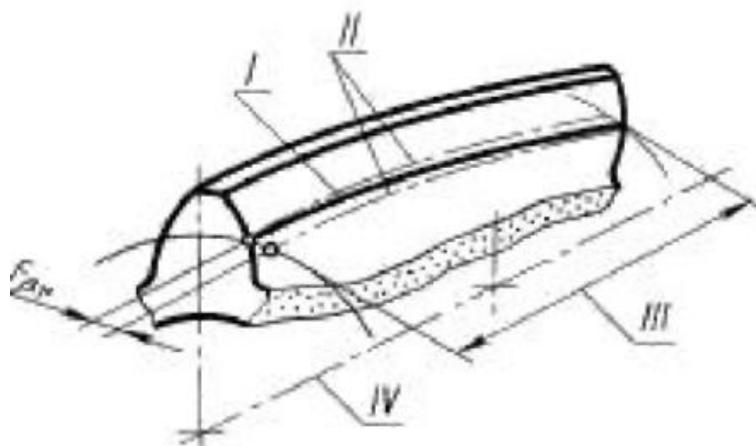


Рис. 6.34. Погрешность профиля зуба F_β :

- I – действительная делительная линия зуба;
- II – номинальная делительная линия зуба;
- III – ширина зубчатого венца;
- IV – рабочая ось зубчатого колеса

Таким образом определяются эксплуатационные свойства цилиндрических зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ и допустимые пределы их изменения, лимитирующие надежность работы передней бабки, механизма продольного и поперечного перемещения суппорта, ламелей, задней бабки станка в целом. Переход от блоков 1 и 2 к блоку 3 является неформализованным, т. е. он не поддается алгоритмизации. Это означает, что на данном этапе проектирования весьма важными факторами являются имеющиеся статистические данные по эксплуатации прототипов проектируемых узлов тяжелых металлорежущих станков с ЧПУ.

После того как определены требуемые эксплуатационные свойства про-

ектируемых цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес и допустимые пределы их изменения, осуществляется поиск соответствующих теоретических или экспериментальных зависимостей, которые характеризуют количественную сторону взаимосвязи между данными эксплуатационными свойствами, физико-механическими свойствами материалов контактирующих цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, параметрами состояния поверхности и условиями функционирования (блок 4).

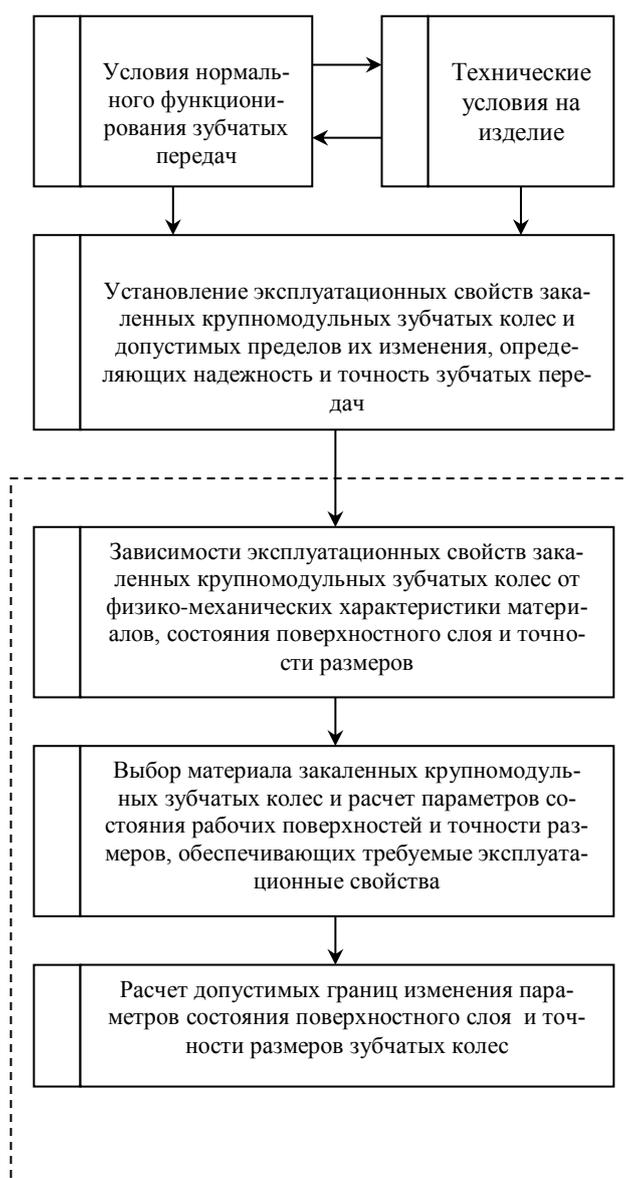


Рис. 6.35. Структурная схема решения задачи на основе совместного анализа условий нормальной эксплуатации и технических условий на изготовления цилиндрических зубчатых колес

В блоке 5 осуществляется выбор материала цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес по физико-механическим свойствам, расчет точности размеров и параметров состояния рабочих поверхностей цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства в допустимых пределах их изменения, подбираются значения аргумента, удовлетворяющего заданной функции. Решение этой задачи усложняется тем обстоятельством, что на аргумент накладываются ограничения, так как физико-механические свойства материалов, параметры состояния реальных поверхностей и точность размеров не могут изменяться в бесконечных пределах. Поэтому в ряде случаев совместное обеспечение нескольких эксплуатационных свойств может оказаться невозможным. Вычисленные параметры состояния поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес должны находиться в диапазоне технологических возможностей, т. е. дополнительно накладываются технические ограничения (6.50).

В блоке 6 осуществляется расчет допустимых пределов изменения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес и точности размеров с учетом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств в заданных пределах их изменения. Таким образом, чем уже определены допустимые интервалы изменения эксплуатационных свойств в блоке 3, тем уже получают расчетные допустимые границы изменения параметров поверхностного слоя и точности размеров цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес (блок 6).

$$\left. \begin{aligned} Ra_{min} &\leq Ra \leq Ra_{max}, \\ Wz_{min} &\leq Wz \leq Wz_{max}, \\ k_{min} &\leq k \leq k_{max}. \end{aligned} \right\} \quad (6.50)$$

Итак, решение задачи, начиная с блока 4, является в достаточной степени формализованным, т.е. может быть алгоритмировано и с успехом осуществлено на ПК. Для расчета эксплуатационных свойств цилиндрических

закаленных крупномодульных зубчатых колес определяем вектор постоянных параметров, используемых при решении задачи и независимых оптимизируемых параметров (6.51) и (6.52).

$$\vec{K} = (\delta, Y, G, M, P, \mu, \sigma_T); \quad (6.51)$$

$$\vec{X} = (Ra_1, Ra_2, W_{\Sigma 1}, W_{\Sigma 2}). \quad (6.52)$$

Система уравнений факторов контактного взаимодействия, технических ограничений, постоянных и оптимизируемых параметров является исходной для разработки алгоритма в блоках 5 и 6.

Блок-схема оптимизационного алгоритма по расчету параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес по одному из эксплуатационных свойств, в частности крутящему моменту, приведена на рис. 6.36. В данном алгоритме генерация случайных значений независимых переменных производится с учетом ограничений (6.51). Далее осуществляется расчет передаваемого крутящего момента, а результат расчета сравнивается с предыдущим значением; запоминается значение момента, наиболее близкое к требуемому, а также величины параметров состояния поверхности, при которых оно получено.

Эта часть алгоритма осуществляется поочередно для каждой нагрузки с заданными значениями передаваемых крутящих моментов. После определения оптимальных значений параметров состояния поверхностей (одного или нескольких) и передаваемых крутящих моментов производится расчет допусков на параметры состояния поверхностного слоя в зависимости от допусков на передаваемый крутящий момент. Функции блока 5 можно структурно разграничить на выбор материалов и определение точности размеров и параметров состояния поверхностного слоя, связав их с функциями блока 6, т.е. производить одновременно определение всех параметров поверхности и пределов их изменения.

Таким образом определяют надежность и долговечность узла или машины в целом по усталостной прочности, износостойкости, долговечности ци-

цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес при использовании комплексных параметров для оценки состояния поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, в частности для износостойкости C_x .

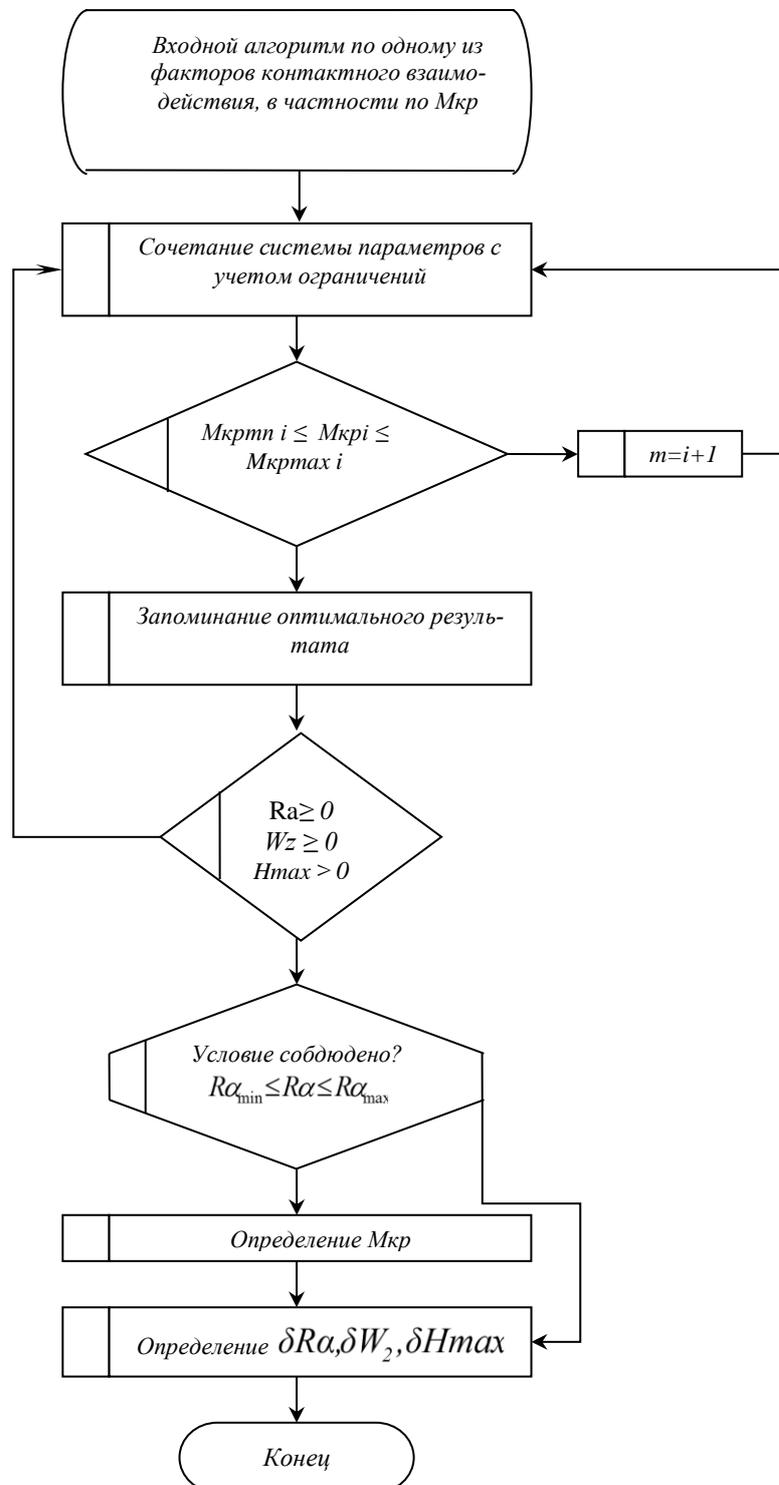


Рис. 6.36. Блок – схема расчета оптимальных параметров состояния контактирующих поверхностей цилиндрических крупномодульных зуб-

чатых колес с учетом системы параметров, характеризующих состояние их поверхностного слоя

На этом завершается решение задачи по обоснованному выбору материалов, назначению параметров состояния рабочих поверхностей и точности размеров цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства, а следовательно, надежность и точность работы эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес узлов, редукторов, систем приводов тяжелых токарных станков.

6.3.3. Комплексные параметры состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес

Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес решается определением комплексных параметров, которые учитывают физическую картину эксплуатации, считаются безразмерными величинами и включают в себя те параметры качества поверхности, которые оказывают основное влияние на процесс эксплуатации закаленных крупномодульных зубчатых колес [38, 94].

Закаленные крупномодульные зубчатые колеса предполагают длительную эксплуатацию в условиях максимальных нагрузок знакопеременного характера. При изготовлении закаленных крупномодульных зубчатых колес необходимо обеспечить такое состояние контактируемых эвольвентных поверхностей, которое гарантировало бы минимальный износ при эксплуатации зубчатых колес, а также постоянство коэффициента трения.

Уравнения для расчета интенсивности износа и коэффициента трения:

а) в период приработки [38, 94]:

$$J_h = \frac{2.5\nu^2 R_a^{2/3}}{n\lambda(\nu+1)S_m t_m^{3/2}} \cdot \frac{P}{K^l \sigma_T} \sqrt{15\pi(2\pi W_z H_{\max})^{1/3} \left[1 + \frac{2\pi K^l \sigma_T (1-\mu^2)}{E} \right]}, \quad (6.53)$$

$$f_h = \frac{\tau_0}{c^l K^l \sigma_T} + \beta + \frac{4\alpha_\Gamma R_a^{2/3}}{S_m t_m} \sqrt{\frac{60\pi}{t_m} \left(\frac{2\pi P W_z H_{\max}}{K^l \sigma_T} \right)^{1/3} \left(1 + \frac{2\pi K^l \sigma_T (1-\mu^2)}{R_a E} \right)}. \quad (6.54)$$

б) в период нормального износа:

$$J = \frac{2.5\pi\nu^{0.5}P^{7/6}}{n\lambda(\nu+1)t_m^{3/2}(K|\sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m}}, \quad (6.55)$$

$$f = \frac{\tau_0}{c|K|\sigma_T} + \beta + \frac{8\alpha_\Gamma(K|\sigma_T)^{1/3}}{t_m} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi PR_a W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m t_m}}. \quad (6.56)$$

где ν – параметр опорной кривой профиля;

n – число циклов воздействия;

λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на число циклов нагружения;

σ_T – предел текучести материала;

τ_0 – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей;

α_Γ – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении;

β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений;

E – модуль упругости материала.

Минимальный линейный износ и стабильность коэффициента трения будет обеспечиваться в случае выполнения неравенств (6.57) и (6.58)

$$J_h \leq J; \quad (6.57)$$

$$f_h \leq f. \quad (6.58)$$

Решив эти неравенства таким образом, чтобы в правой части оказались параметры, зависящие от технологического обеспечения, а в левой – те из них, на которые процесс обработки не оказывает влияния, получим:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^l (S_m - R_a)}. \quad (6.59)$$

Величиной R_a , стоящей в знаменателе правой части, можно пренебречь, так как при механических методах обработки они на два порядка меньше величины S_m (в формуле значение в микрометрах):

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^l \cdot S_m} \quad (6.60)$$

Запишем левую часть (6.59) в виде комплексного параметра I , характеризующего условие равномерного износа в различных стадиях обработки (6.61)

$$I = \frac{R_a}{K^l \cdot S_m} \quad (6.61)$$

Значение комплексного параметра, обеспечивающего требуемое условие, определим из выражения (6.62)

$$[I] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \quad (6.62)$$

Проведен эксперимент на машине трения МИ-1М с образцами из стали 40Х и 38ХМЮА с использованием масштабного фактора. В качестве контртела применялась сталь 34ХНМ. Скорость относительного движения образцов 0,2 м/с. Результаты эксперимента табл. 6.1 показывают, что при выполнении условия $I \leq [I]$ наблюдается меньший линейный износ и наиболее стабильное значение коэффициента трения.

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные по интенсивности износа

Материал образца	Условия проведения эксперимента и значения параметров трения			
	$I \leq [I]$		$I \geq 2[I]$	
	Линейный износ	Коэффициент трения	Линейный износ	Коэффициент трения
40Х	0,006	0,64	0,03	0,26
38ХМЮА	0,0012	0,51	0,012	0,14

Экспериментальные данные по интенсивности износа и коэффициенту трения после 3 минут приработки образцов с контртелом из стали 34ХНМ приведены в табл. 6.1 для средних значений и трех опытов.

Общие закономерности изнашивания эвольвентных зубчатых передач учитывают влияние приведенного радиуса кривизны, состояния поверхностного слоя (шероховатость эвольвентной поверхности, волнистость, параметры макроотклонения, микротвердость, остаточного напряжения поверхност-

ного слоя), давления, удельного скольжения и создание условий самовосстановления эвольвентного профиля зубчатого колеса за счет эффекта избирательного переноса.

Изменение этих факторов определяют распределение износа по профилю зуба. Теоретическое распределение износа профиля зуба предполагает отсутствие износа в полюсе зацепления, где относительное скольжение зубьев равно нулю.

Однако в отличие от теоретического распределения износ в полюсе, как показывает анализ экспериментальных данных, может быть существенным. На рис. 6.37 представлена эпюра износа зуба шестерни, полученная на основании анализа опытных данных [38].

Износ оценивался по изменению толщин зуба, измеренных в 10 точках профиля от ножки до головки зуба. Представляет определенный интерес износ в зоне полюса. Результаты стендовых испытаний показали, что на профиле зуба шестерни в процессе изнашивания образуется выемка, а на сопряженном зубе колеса – выступ. Повышенный износ наблюдался на головке зуба.

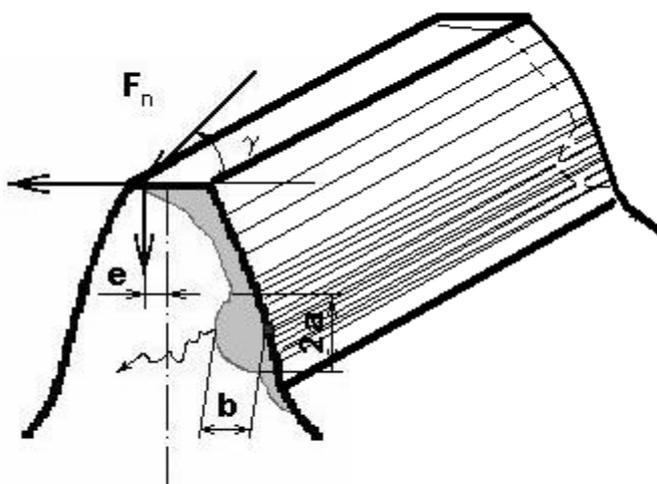


Рис. 6.37. Эпюра износа зуба шестерни зубчатой передачи

По степени износа или поврежденности рабочей поверхности зуба обычно оценивают ресурс передачи.

Ресурс закрытых передач определяется питтингом (рис. 6.38), причем площадь не должна превышать 30 % площади рабочей поверхности зуба при глубине питтингов свыше 10 % толщины зуба.



Рис. 6.38. Образование питтингов на поверхности зуба колеса

Нарушение кинематической точности наблюдается при износе, превышающем $0,025 \cdot m$. Износ провоцирует зарождение и развитие трещин под действием напряжений растяжения. После того как образуется магистральная трещина, ее рост определяется значением коэффициента интенсивности напряжения.

6.3.4. Комплексный параметр по обеспечению долговечности закаленных крупномодульных зубчатых колес

Одной из важных характеристик закаленных крупномодульных зубчатых колес является способность длительной работы до 10000 – 24000 часов без разрушения и скола зубьев, которые могут быть вызваны процессами усталости, выкрашиванием активных поверхностей и отслаиванием поверхностных слоев зубьев, абразивным износом зубьев, пластических деформаций зубьев и заеданием.

Влияние различных факторов на предел выносливости реальных деталей при проведении расчетов на долговечность определяются коэффициентом снижения предела выносливости K_y [38, 94] (6.63)

$$K_y = \frac{\sigma_{-1(Rz \leq 1)}}{\sigma_{-1D}}, \quad (6.63)$$

где $\sigma_{-1(Rz \leq 1)}$ – предел выносливости не упрочненного образца с высотой неровности профиля;

σ_{-1D} – предел выносливости зубчатого колеса;

K_y – коэффициент влияния факторов на сопротивление усталости.

При работе на сжатие или изгиб коэффициентом снижения предела выносливости K_y определяется по (6.64)

$$K_y = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v K_A}, \quad (6.64)$$

где, $K_{d\sigma}$ – коэффициенты, учитывающие влияние статического масштабного фактора;

K_A – коэффициент анизотропии;

K_v – коэффициент, учитывающий влияние отклонений структуры и твердости ;

K_{Fv} – коэффициент, учитывающий влияние качества поверхности;

K_σ – коэффициент снижения пределов выносливости вследствие концентрации напряжений;

Так как в процессе подготовки образцов зубчатых колес влияние на коэффициенты $K_{d\sigma}$, K_A , K_v оказывается незначительное, их можно принять при рассмотрении равными единице, а значение коэффициента K_y записать в виде (6.65)

$$K_y = K_\sigma + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1. \quad (6.65)$$

Создание поверхностного слоя приводит к изменению предела выносливости $K_{F\sigma}$, (6.66)

$$K_{F\sigma} = \left[(1.05 \div 1.20) - 0.0005 \sigma_{\text{Инов}} \right], \quad (6.66)$$

который с учетом допущения (6.67)

$$K^l \approx \frac{\sigma_{\text{внос}}}{\sigma_{\epsilon}} \approx \frac{\sigma_{\text{Инов}}}{\sigma_{\text{И}}}, \quad (6.67)$$

и того, что K^l при механических методах зубообработки колеблется в пределах $K^l = (1.0 - 1.4)$, а при расчетах на прочность закаленных зубчатых колес принимается предел прочности на изгиб $\sigma_{\text{И}} = 1380$ МПа, запишем в виде (6.68)

$$K_{F\sigma} = 0,75 \cdot K^l, \quad (6.68)$$

и тогда коэффициент снижения предела выносливости K_{σ} в приближительных расчетах можно принять

$$K_{\sigma} = 1 + g(\alpha_{\sigma} - 1), \quad (6.69)$$

где α_{σ} – коэффициент концентрации напряжений рассчитывается по (6.70)

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{200}{t_m S_m} [2R_{\text{max}} (R_{\text{max}} - R_p)]^{0.5}, \quad (6.70)$$

а g – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений, определится зависимостью (6.71)

$$g = (\gamma\rho)^{0.20}, \quad (6.71)$$

где γ – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения величины $\sigma_{\text{T}}/\sigma_{\text{В}}$; ρ – радиус скругления неровности, являющийся концентратором напряжений.

При наличии волнистости неровность, выступающую в качестве концентратора (рис. 6.39), представим в виде модели (рис. 6.40), где в качестве радиуса скруглений принят радиус скругления волн, определяемый из соотношения (6.72)

$$\rho_{\epsilon} = R_{m\omega} = \frac{125S_{m\omega}}{6R_a}. \quad (6.72)$$

Решим уравнение (6.61), выполнив соответствующие подстановки, известные из (6.70) – (6.72).

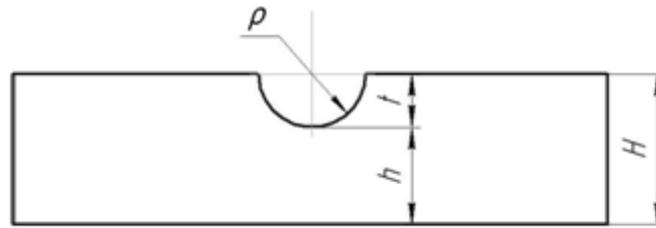


Рис. 6.39. Форма пластины, принятой в расчете

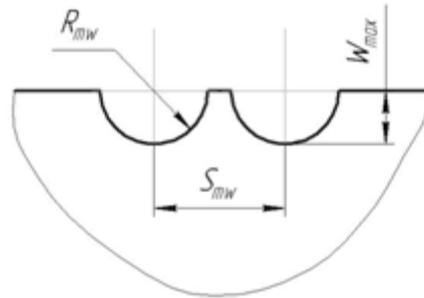


Рис. 6.40. Модель единичного концентратора напряжений

С целью упрощения зависимостей используем соотношения технологического обеспечения при механической зубообработке поверхностей (6.73)

$$K_{\sigma} = 1 + \frac{900 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (6.73)$$

Подставив значения (6.68), (6.73) в (6.64) получим (6.74)

$$K_y = \frac{1}{0,75K^1} + \frac{67,5 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (6.74)$$

Выполним подстановку (6.73) в (6.63) и решим его так, чтобы в правой части оказались параметры, формируемые при подготовке состояния поверхностного слоя образцов, а в левой – не зависящие от технологического обеспечения

$$\frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{K^1 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \quad (6.75)$$

Обозначим правую часть через комплексный параметр D_T , характеризующий снижение порога усталости в зависимости от качества подготовки опорных поверхностей режущих пластин (6.76)

$$D_T = \frac{K^l \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \quad (6.76)$$

Левую часть обозначим через D_K (конструкторское значение параметра). Тогда получим (6.77)

$$D_K = \frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (6.77)$$

В практических расчетах определения влияния параметров технологического обеспечения на усталость режущих пластин для материалов, приведенных в табл. 6.2, соотношение $\sigma_T/\sigma_s = 0,9$ и при применении механических методов обработки $t_m \approx 0,55$; $\rho \approx (2 - 5)$; $\gamma \approx (0,3 - 0,5)$; $K^l \approx (1,1 - 1,3)$.

Наиболее удобно выражение (6.77) записать в виде (6.78)

$$\frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} = 0,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (6.78)$$

Таблица 6.2 – Результаты исследования и расчета параметров D_K и D_T

№ опыта	W_a , МКМ	R_a , МКМ	S_{mw} , МКМ	S_m , МКМ	D_K	D_T
1	5	0.63	1200	16	0.004	0.580
2	5	0.63	1200	32	0.250	0.290
3	5	2.5	1200	100	0.130	0.370
4	5	2.5	1200	125	0.260	0.300
5	5	0.63	2800	62	0.130	0.120
6	5	0.63	2800	125	0.001	0.100
7	15	2.5	1200	100	0.200	0.300
8	5	2.5	2800	100	0.230	0.520
9	5	2.5	2800	125	0.370	0.420
10	15	0.63	2800	125	0.170	0.010
11	15	0.63	2800	62	0.450	0.170
12	15	2.5	1200	125	0.210	0.240
13	15	0.63	1200	62	0.410	0.120
14	15	0.63	1200	125	0.260	0.010
15	15	2.5	2800	62	0.140	0.670
16	15	2.5	2800	125	0.440	0.330

Тогда

$$D_T = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m}, \quad (6.79)$$

$$D_K = 0,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (6.80)$$

С целью проверки теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования. В качестве образцов использовались образцы, приведенные на рис. 6.39 и рис. 6.40. Результаты исследования и расчета параметров D_K и D_T приведены в табл. 6.2 (рис. 6.41).

При назначении данного комплексного параметра всегда соблюдается соотношение $D_K \leq D_m$.

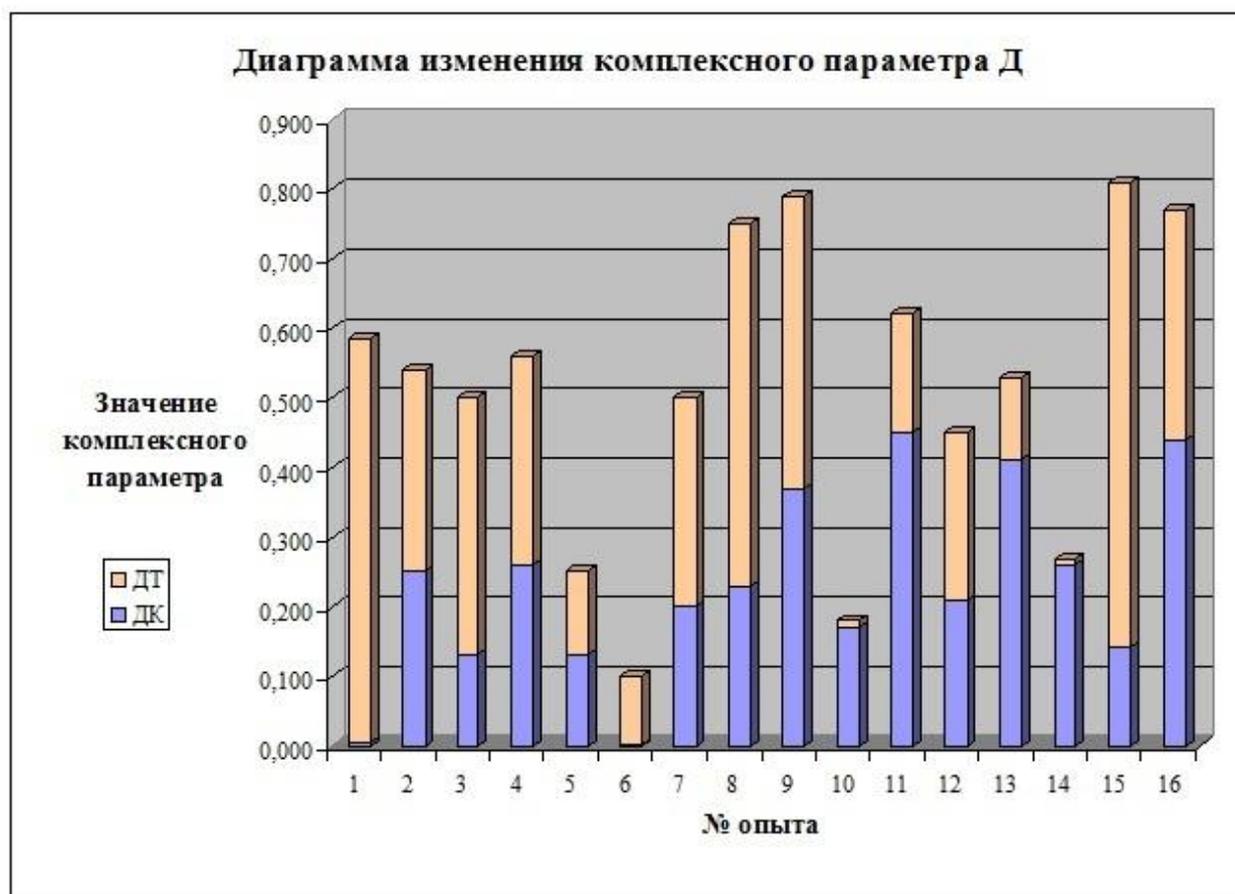


Рис. 6.41. Диаграмма изменения комплексного параметра $D \in \{DT, DK\}$

6.3.5. Комплексный параметр по обеспечению минимальных пластических деформаций зубьев закаленных крупномодульных зубчатых колес

Эксплуатационные показатели контактирующих эвольвентных поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес изменяют свои значе-

ния. Происходящие изменения обуславливают изменение эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес в целом. Следовательно, необходимо стремиться создать состояние поверхности с, минимально изменяющей свои параметры качества в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации невозможно контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления. В то же время вид износа, характер разрушения и распределение действующих сил позволяют получить информацию о параметрах их эксплуатации и характере износа (рис. 6.42) [38].

*a**б*

Рис. 6.42. Превышение предела выносливости материала приводит к износу рабочей поверхности: *a* – начальная стадия; *б* – предельное состояние

Изменения параметров шероховатости, являющихся определяющими при оценке эксплуатационных свойств, будут минимальными при наступлении насыщения, которое определяется из условия (6.81)

$$Y_{nl} \geq 0,9 \cdot R_p. \quad (6.81)$$

Из теории контактного взаимодействия известно, что пластическая со-

ставляющая контактных перемещений (6.82)

$$Y_{nl} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot P \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max}}{A \cdot K^l \cdot \sigma_T} \right). \quad (6.82)$$

Подставим величины из (6.81) в (6.82), заменив $R_p \approx 3 \cdot R_a$ и выполнив преобразования так, чтобы в левой части оказались величины, не зависящие от технологического обеспечения, а в правой – формируемые в ходе изготовления (6.83)

$$\frac{P}{A \cdot \sigma_T} \geq \frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{\max}}. \quad (6.83)$$

Представим правую часть в виде комплексного параметра (6.84)

$$H = \frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{\max}}. \quad (6.84)$$

Тогда выражение (6.83) записывается в виде (6.85)

$$H = \frac{P}{A \cdot \sigma_T}. \quad (6.85)$$

Экспериментальная проверка полученных зависимостей проводилась на контрольно-обкатном станке мод. 5A275 при контактировании зубчатых колес из стали 40Х и 34ХНМ с шероховатостью поверхности $R_a=2,5$ мкм, $\sigma_T = 1280$ МПа, $H_{\max} = 30$ мкм. Площадь контакта $A = 60,0$ мм².

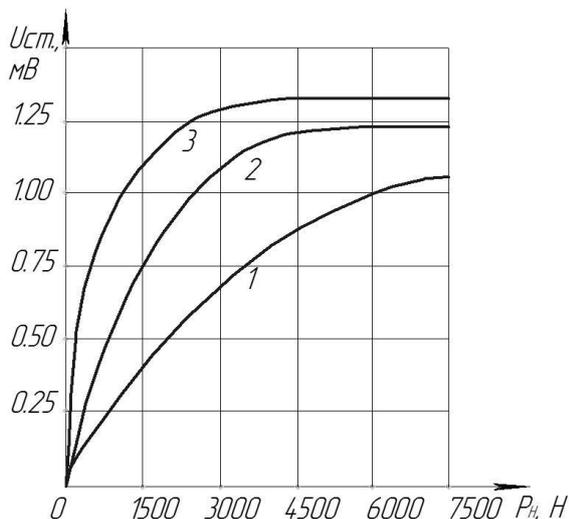


Рис. 6.43. Значения усилия нагрузки P до момента насыщения

С целью фиксации момента насыщения проводилось измерение статического напряжения различных монотонно возрастающих контактных нагрузок с помощью осциллографа С1-112. На рис. 6.43 приведены расчетные и экспериментальные значения усилия нагрузки P до момента насыщения.

На рис. 6.44, а показаны зависимости изменения величины линейного

смещения вершины зуба колеса Y_n после 1000 часов работы, при окружной скорости 12 м/с, при регламентации параметра I . На рис. 6.44, б регламентация проводилась по параметру R_z .

Производственные испытания показывают, что такие показатели, как износ эвольвентной поверхности зуба колеса при контроле смещения отклонения колебания длины общей нормали W_{AT} , при одних и тех же регламентируемых параметрах качества поверхности имели меньшую дисперсию рассеяния при использовании предлагаемых рекомендаций, чем в случае традиционной регламентации состояния контактируемых поверхностей.

В настоящее время, в связи с активным внедрением в инженерную практику вычислительной техники, наиболее эффективным приближенным методом решения прикладных задач механики является метод конечных элементов (МКЭ).

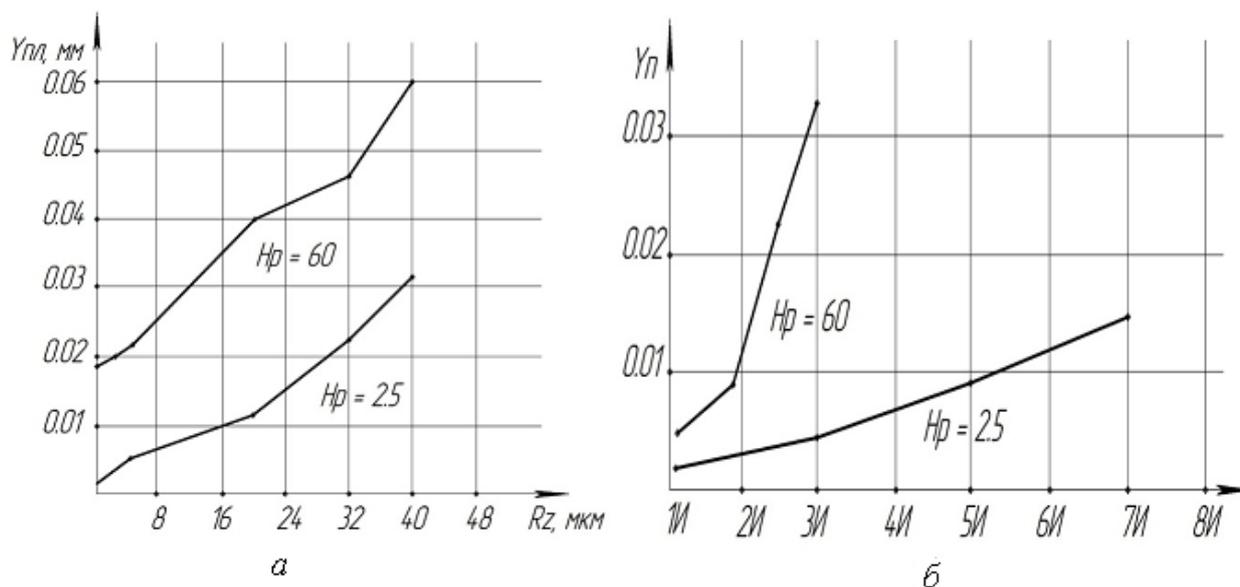


Рис. 6.44. Величина линейного смещения вершины зуба колеса:

- a – традиционная методика регламентации качества поверхности;
- b – регламентация при помощи комплексных параметров;
- (H_p – высота сглаживания макроотклонений, мкм)

Ключевая идея МКЭ заключается в следующем: сплошная среда (конструкция в целом) заменяется дискретной путем разбиения ее на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора функций, представляющих собой напряжения и перемещения в указанной области. Конечные элементы соединяются узлами. Взаимодействие конечных элементов друг с другом осуществляется только

через узлы. Элементы расположены определенным образом в зависимости от конструкции объекта и закреплены в соответствии с граничными условиями. Конечные элементы позволяют адекватно описать все многообразие конструкций и деталей. Метод конечных элементов относится к вариационным методам теории упругости и позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние плоских и объемных элементов конструкций. Для моделирования деформированного состояния зуба в настоящей работе были использованы модули пакета APM WinMachine: APM Studio и APM Structure3D. Профиль зуба строился посредством программы КОМПАС 3D V7 Plus. Модель зуба формировалась путем вырезания зуба из зубчатого колеса двумя плоскостями, проведенными через середины соседних впадин и

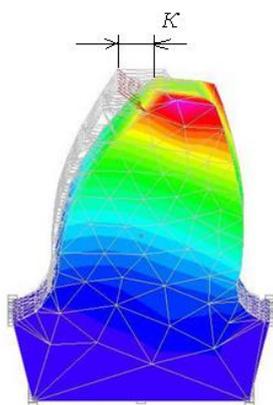


Рис. 6.45. Схема объемной деформации зуба при эксплуатации зубчатого колеса

ось вращения. Полученный сектор отсекался плоскостью, перпендикулярной оси симметрии зуба, на расстоянии от его основания, равном примерно двум модулям зацепления, что меньше минимальной рекомендуемой толщины обода зубчатого колеса. Конечные элементы формировались плоскостями, проведенными с определенным шагом по длине зуба и перпендикулярно оси симметрии зуба. Был заложен вариант нагружения, соответствующий последовательному приложению распределенной нагрузки по высоте зуба. В первом приближении нагрузка по длине зуба считалась равномерно распределенной. Ха-

актер объемной деформации зуба – K , полученной при применении метода конечных элементов, представлен на рис. 6.45.

В связи с тем, что оба метода являются независимыми друг от друга, за истинное перемещение можно принять среднее значение двух методов. При таком допущении максимальная степень несовпадения результатов не превышает 20 %. Следует также учитывать то обстоятельство, что полное перемещение является суммой перемещений в результате объемной и контактной деформаций зуба, причем эти перемещения являются перемещениями одного

порядка.

Таким образом, можно считать, что максимальное несовпадение полного перемещения точки приложения силы при применении любого из двух методов не превышает 10 %.

6.3.6. Качество поверхностного слоя зубьев при чистовой зубообработке крупномодульных закаленных колес

В случае изготовления закаленных колес крупного модуля ($m=12...36$ мм; $\beta_b = 25^\circ...28^\circ$; $D_a = 400...2500$ мм; $a_s = 400...700$ мм), где из-за значительных деформаций зубьев в процессе цементации и закалки, даже после предварительной лезвийной обработки червячными твердосплавными фрезами, остается припуск порядка 1,2...2,7 мм на сторону [38].

Предложенная взамен зубошлифования новая технология чистовой лезвийной обработки зубьев закаленных колес дисковыми немодульными фрезами, оснащенными минералокерамикой, позволяет существенно снизить трудоемкость зубообработки и при этом обеспечивает более высокое качество поверхностного рабочего слоя зубьев.

С целью сравнения качества поверхностного слоя закаленных зубьев, обработанных зубошлифованием и зубофрезерованием дисковыми фрезами, были проведены лабораторные и производственные исследования.

Лабораторные исследования проведены методом моделирования с использованием заготовок-образцов из стали 20Х2НЧА с твердостью HRC_3 , 50...55.

На рис. 6.46 показана микроструктура цементированного слоя образцов.

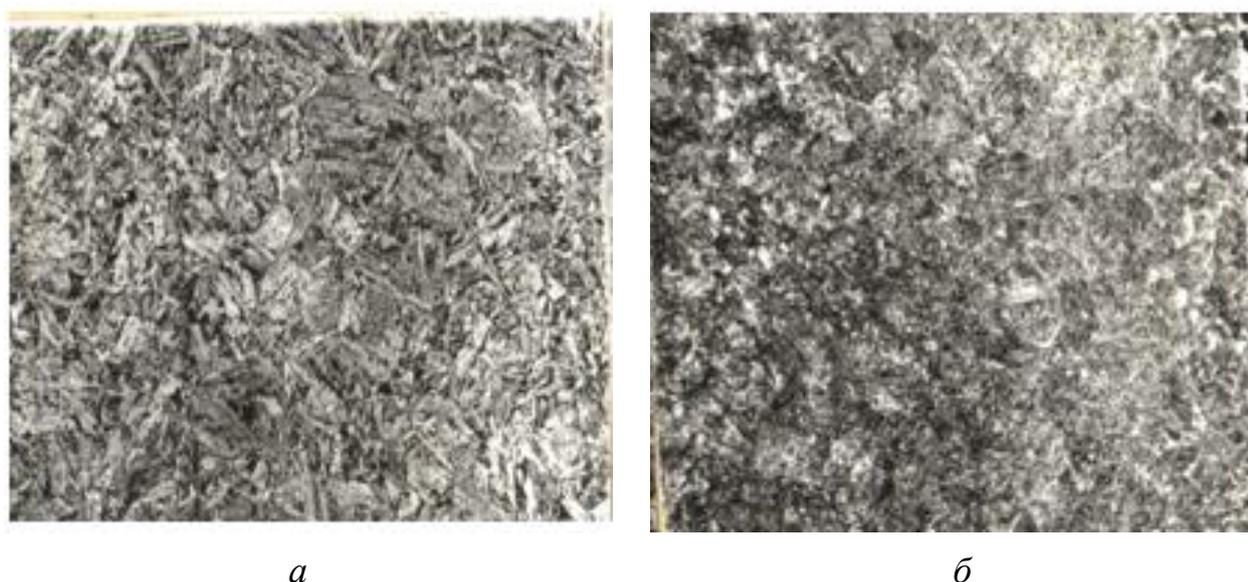


Рис. 6.46. Микроструктура цементованного слоя образцов $\text{Ø}20 \times 100$ мм из стали 20Х2Н4А: *а* – глубина цементованного слоя 2,9 мм; *б* – глубина распространения цементованной сетки до – 0,25 мм

Образцы для последующих испытаний предварительно шлифовали абразивным кругом марки 250х25х127 25А 25 СМ2 К на режимах: глубина шлифования $t = 0,06$ мм, поперечная подача $S = 4,0 - 4,5$ мм/дв.ход, длина хода стола $L = 250$ мм, число двойных ходов $n = 28$ дв.ход/мин, скорость резания $V = 0,23$ м/сек, СОЖ – трех процентный раствор эмульсола в воде.

В 1 – й группе образцов из 20 шт было сошлифовано по 0,8 мм слоя металла. Режимы шлифования соответствовали черновому шлифованию на зубошлифовальных станках.

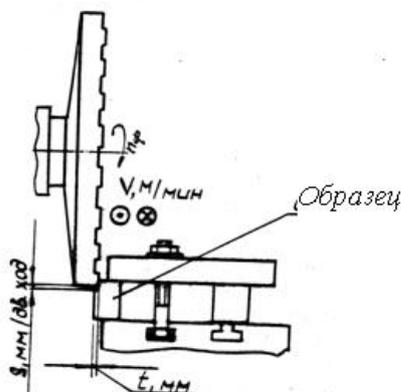


Рис. 6.47. Схема фрезерования цементованных закаленных образцов дисковой немодульной фрезой, оснащенной пластинками из минералокерамики ВOK71

Во 2 – й группе образцов из 20 шт было сошлифовано по 0,03 мм слоя металла, что соответствовало чистовому шлифованию на зубошлифовальных станках.

Микроструктура образцов была исследована на гранях, перпендикулярных прошлифованным.

На рис. 6.47 показана схема обработки образцов на горизонтально-фрезерном станке. На шпинделе станка закрепляли на специальной оправке дисковую фрезу

рис.6.48 (диаметр фрезы $\varnothing 400$ мм, число зубьев $z=24$, оснащенную пластинками из минералокерамики марки ВОК-71).

Обработка велась на режимах: глубина резания (один проход) $t = 0,8$ мм, подача $S = 0,8$ мм/дв.ход, продольная скорость стола станка $V = 8$ м/мин, без применения СОЖ. Часть образцов была обработана на тех же режимах, но при глубине резания $t = 0,4$ мм, продольной скорости стола $V = 8$ м/мин (2 прохода), оборотов фрезы $n_{\phi} = 315$ об/мин; скорость резания составляла $V_{\phi} = 6,6$ м/сек.



Рис. 6.48. Дисковая немодульная фреза одностороннего резания $t=12...36$ мм

Исследование микроструктуры цементирования закаленных образцов выполняли на металлографическом микроскопе «Neophot – 21» на шлифах после травления в четырех процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Замеры микротвердости производили на микротвердомере мод.ПМТ-3 (рис. 6.49) методом вдавливания в испытуемый материал алмазного наконечника Виккерса с квадратным основанием четырехгранной пирамиды, обеспечивающей геометрическое и механическое подобие отпечатков по мере углубления индентора под действием нагрузки.



Рис. 6.49. Микротвердомер мод. ПМТ-3

Измерение диагоналей отпечатков производили с помощью фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-1-16 с автоматической обработкой результатов измерения.

Структурных изменений в образцах после различных методов и режимов механической обработки не обнаружено. Микроструктура на всех образцах (шлифованных и фрезерованных) – мартенсит (рис. 6.50).

Изменение микротвердости на образцах, приведено на рис. 6.51. При черновом шлифовании микротвердость по сравнению с чистовым шлифованием снижается примерно на 1 %, а при черновом фрезеровании по сравнению с чистовым фрезерованием – на 0,5 %. Мик-

ротвердость фрезерованных образцов по сравнению с микротвердостью шлифованных образцов выше на 0,4 %.

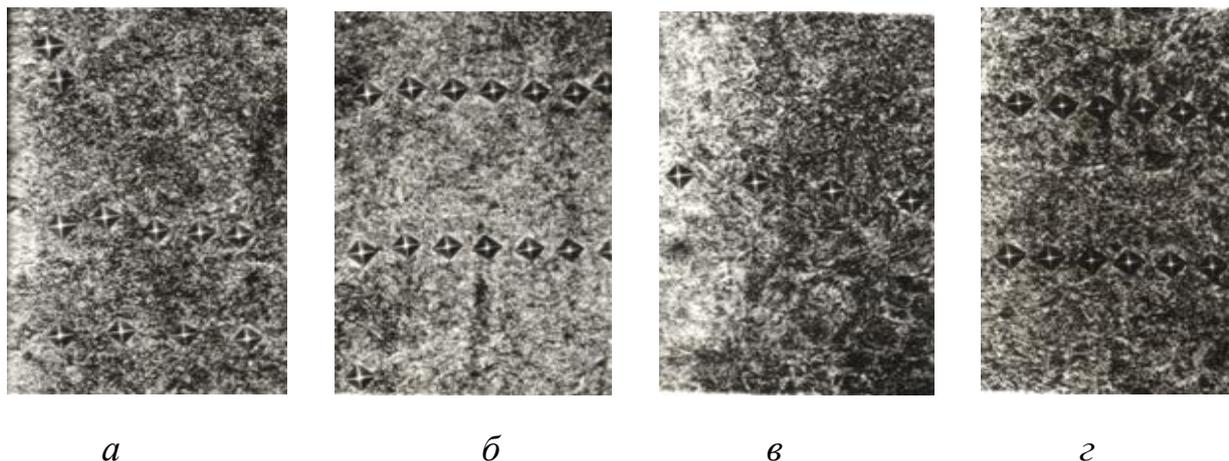


Рис. 6.50. Микроструктура цементированного слоя образцов после шлифования и скоростного фрезерования (x 400): *a* – образцы после предварительного шлифования; *б* – образцы после окончательного шлифования; *в* – образцы после предварительного фрезерования; *г* – образцы после окончательного скоростного фрезерования

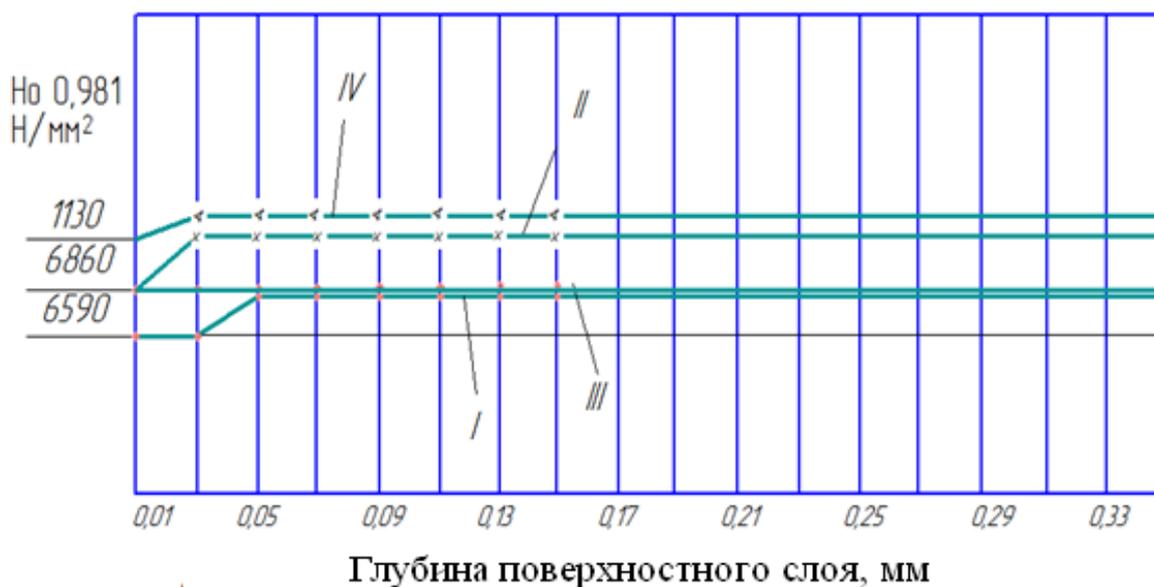


Рис. 6.51. Влияние методов и режимов механической обработки на микротвердость поверхностного слоя: I – шлифование черновое; II – шлифование чистовое; III – фрезерование черновое; IV – фрезерование чистовое

Производственные исследования новой технологии чистовой обработки закаленных колес производились в производственных условиях ПАО «НКМЗ» при обработке колес псевдопланетарного редуктора со следующими

характеристиками: $m = 28$ мм; $z_1 = 17$, $z_2 = 24$, $z_3 = 32$; $b = 400$ мм; $\beta_d = 0^\circ$; сталь 20X2H4A; HRC 52...58 (цементация с закалкой).

Зубообработка проводилась на зубострогальном станке (рис. 6.52) фирмы «МАОГ» модели HS-450/500 с использованием специального одношпиндельного фрезерного суппорта и дисковой фрезы, оснащенной режущей керамикой марки ВOK71.

Согласно техническим требованиям точность колес должна была соответствовать по нормам кинематической точности, плавности и контакта – 8 – й степени. Вместе с тем в связи с высокими требованиями по изгибной и контактной прочности шлифовка зубьев, с целью исключения прижогов и микротрещин, не допускалась.

Режимы резания при обработке колеса использовать следующие:



Рис. 6.52. Технологическая схема обработки зубчатого колеса на зубострогальном станке с использованием одношпиндельного спецсуппорта и дисковой фрезы, оснащенной минералокерамическими режущими пластинками

Черновой проход:

- глубина резания – 0,4 – 0,6 мм;
- число двойных ходов инструмента за один цикл обработки – 80;

- скорость движения ползуна – 6 м/мин;
- частота вращения фрезы – 250 мин⁻¹;
- скорость резания – 5 м/сек.

Чистовой проход:

- глубина резания – 0,3 мм;
- число двойных ходов инструмента за один цикл обработки – 80;
- скорость движения ползуна – 6 м/мин;
- частота вращения фрезы – 250 мин⁻¹;
- скорость резания – 5 м/сек.

Обработка велась без применения смазывающе-охлаждающих жидкостей. Направление фрезерования встречное. Попутное фрезерование не допускается, т.к. стружка сходит раскаленная (рис. 6.52) и сход ее должен быть только вниз на стол станка. Процесс обработки протекает плавно, без вибраций инструмента, суппорта и заготовки. Машинное время обработки составило 8 часов.

Для исследования качества поверхностного слоя из зубьев были вырезаны образцы.

Нетравленные образцы зубьев помещали в металлографический микроскоп «Neophot-21» (Англия).

В результате визуальных наблюдений обработанной поверхности прижоги, микротрещины и другие дефекты обнаружены не были. Шероховатость обработанных поверхностей зубьев находится в пределах $R_a = 0,8 - 1,5$ мкм, что соответствует зубошлифованию, а в некоторых случаях может быть и ниже.

Травление образцов зубьев, а также шлифов проводилось в 4 % – ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. На травленных образцах прижоги и микротрещины обнаружены не были.

Металлографические исследования образцов (шлифов) позволили сделать следующие выводы.

Структура образцов ферритно-перлитная. Поверхностная микротвер-

дость измерялась на приборе «ПМТ-3» при нагрузке 20 г с интервалом по глубине 0,02 мм. Измерения микротвердости показали наличие наклепаного слоя глубиной 0,04 мм ($H_{0,196} = 226 - 2340$ н/мм²). Результаты замеров приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3 – Микротвердость образцов зубьев

Глубина замера, мм	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
Микротвердость, МПа	2260	2340	2040	2040	2040	1950	1950

Наличие наклепа свидетельствует о присутствии в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. По сравнению с процессом зубошлифования, при котором в поверхностном слое детали создаются растягивающие напряжения, лезвийная обработка, как видим, более благоприятна. Сжимающее напряжение повышает износостойкость детали, контактную и изгибную прочность зубчатых передач.

6.3.7. Многокритериальная оптимизация двухступенчатого технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе применения комплексных параметров их состояния

В настоящее время качество поверхности регламентируется параметрами в соответствии с ГОСТ 2.308-79 и ГОСТ 2789-73. В то же время, как показывают научные исследования, технологическое обеспечение наиболее эффективно осуществлять с помощью комплексных параметров состояния поверхности. Их выбор, обеспечение при изготовлении раскрывают новые резервы снижения себестоимости и повышения качества зубчатых колес.

Двухступенчатая схема технологического обеспечения ЭС (эксплуатационных свойств) основывается на разделении задач технолога и конструктора с регламентацией комплексных параметров на каждой из этих стадий. А затем с последующим решением задачи выбора оптимального значения ЭС.

Предложена структура модели, на базе которой осуществляется выбор метода и режимов обработки поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес при обеспечении нескольких ЭС, с сохранением традиционных подходов к регламентации поверхности. Она включает в себя следующие этапы:

- определение структуры ЭС, которые предъявляются к закаленным крупномодульным зубчатым колесам, и установление формальных численных и граничных значений;
- выбор комплексных параметров рабочих эвольвентных поверхностей, их теоретическое обоснование, расчет их численных значений на стадии конструкторской или технологической разработки и их регламентация;
- назначение возможных методов обеспечения комплексных параметров на стадии выбора технологического метода зубообработки;
- функционально-стоимостный анализ (ФСА) методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений ЭС;
- расчет режимов и выбор оптимальной технологии зубообработки;
- прогнозирование гарантии качества характеристик поверхностей и, как следствие, закаленных крупномодульных зубчатых колес при выборе данного технологического обеспечения.

При конструировании важной задачей является установление ЭС, предъявляемых к закаленным крупномодульным зубчатым колесам. Необходимо установить лимитирующие ЭС, которые определяют надежность и точность зубчатых колес. Эти и другие вопросы рассматриваются при решении задачи в блоках 1 – 4 (рис. 6.53), при этом следует обратить внимание на их численные значения и рациональность назначения.

На этапе конструкторской подготовки производства выбор комплексных параметров, характеризующих ЭС поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес можно производить, используя табл. 6.4.

Таблица 6.4 – Комплексные параметры (КП), применяемые при технологическом обеспечении ЭС поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых

колес в период нормального износа [38, 94]

Наименование поверхности	КП	Технологическое значение параметров	Расчетно-конструкторское значение параметров
Работающие в условиях выкрашивания активных поверхностей	C_x	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^l)^2}$	$3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot J_{II} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Работающие в условиях отслаивания поверхностных слоев зубьев	П	$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^l)^{0,5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[\frac{\sigma_T \cdot J_{III}^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Работающие в условиях поломки зубьев	Н	$\frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{man}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Работающие в условиях абразивного износа зубьев	И	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^l}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Работающие в условиях пластических деформаций зубьев	Д	$\frac{K^l \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0,2}}{13.5} \cdot \left[\frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$
Работающие в условиях задания	C_M	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

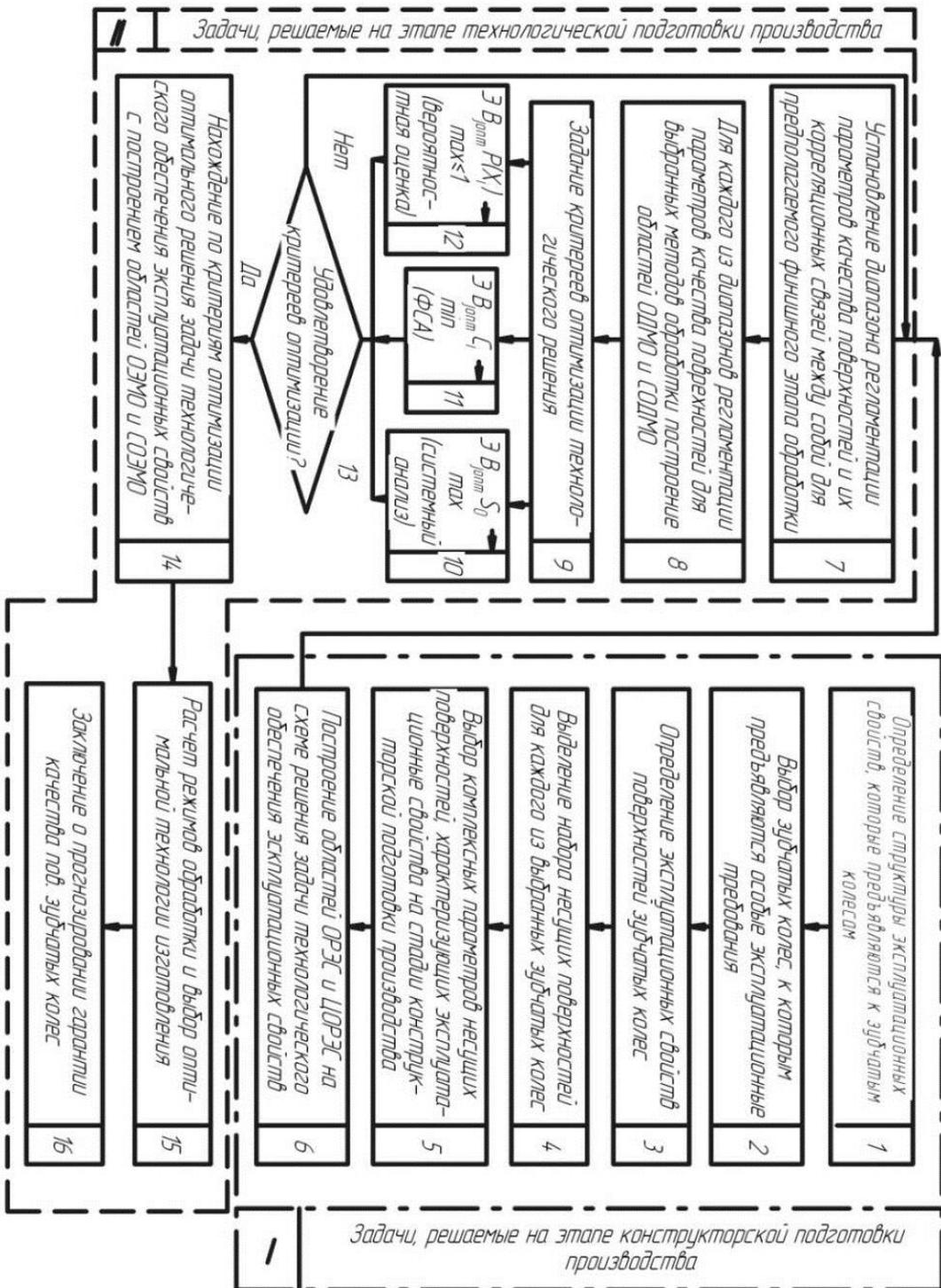


Рис. 6.53. Структура моделирования технологического обеспечения ЭС поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес

На этом этапе комплексный параметр принимается равным значению параметра в период нормального износа и определяется только физико-механическими свойствами и условиями эксплуатации. Данная задача решается в блоке 5 (рис. 6.53).

Построение области регламентируемых значений ЭС (ОРЭС) выполняется с использованием прикладной математики. При обеспечении нескольких ЭС нужно построить для каждого из них свою область ОРЭС и пересечением этих областей друг с другом определить целеобразную область регламентируемых значений ЭС (ЦОРЭС). Эта область будет включать все ЭС, достижение которых поставил конструктор перед технологом. По сути дела, это выходная информация конструктора, необходимая технологу, как исходные данные для технологического обеспечения ЭС поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес (блок 6, рис. 6.53).

Для решения задачи оптимизации технологического обеспечения ЭС необходимо по (6.86) и (6.87) определить параметры области ОРЭС (ЦОРЭС):

$$S_{Pij} = (X_{iPij\max} - X_{iPij\min}) \cdot (Y_{jPij\max} - Y_{jPij\min}), \quad (6.86)$$

$$S_{P\Sigma ij} = (X_{iP\Sigma ij\max} - X_{iP\Sigma ij\min}) \cdot (Y_{jP\Sigma ij\max} - Y_{jP\Sigma ij\min}), \quad (6.87)$$

где $X_{iP\Sigma ij\max}$, $X_{iP\Sigma ij\min}$ – минимальные и максимальные значения параметров качества поверхности, являющихся ограничительными функциями области $P_{\Sigma ij}$ (ОРЭС, ЦОРЭС);

$Y_{jP\Sigma ij\max}$, $Y_{jP\Sigma ij\min}$ – минимальные и максимальные значения комплексных параметров состояния поверхности, отражающих ее ЭС.

Задачей технолога на первом этапе является предварительное установление финишного этапа зубообработки поверхностей при помощи графовой модели технологического процесса, с использованием вместо среднего арифметического отклонения профиля R_a и качества точности IT , комплекс-

ного параметра и качества точности IT .

Также его задачей является установление диапазона регламентации качества поверхностей на окончательном этапе зубообработки и выявление корреляционных связей между этими параметрами по (6.88) и (6.89). Все эти задачи решаются в блоке 7 (рис. 6.53).

$$R_a = f(R_z); R_{max} = \varphi(R_z); t_m = \psi(S_m); t_{mw} = \zeta(S_{mw}); W_p = \chi(W_z); \quad (6.88)$$

$$W_z = F(S_{mw}); W_z = \zeta(W_{max}); H_p = r(H_{max}); \sigma = g(h_\sigma). \quad (6.89)$$

Далее следует построить схему системной оптимизации (блок 8, рис. 6.53) технологического обеспечения ЭС (рис. 6.54) с определением площадей областей ОРЭС, ЦОРЭС, области достижимых значений ЭС метода обработки (ОДМО), совместной области ОДМО (СОДМО), области эффективных значений метода обработки (ОЭМО), совместной области ОЭМО (СОЭМО). На рис. 6.55 показана схема задачи функционально – стоимостного анализа (ФСА) и методов обработки с позиции совместного обеспечения необходимых значений ЭС.

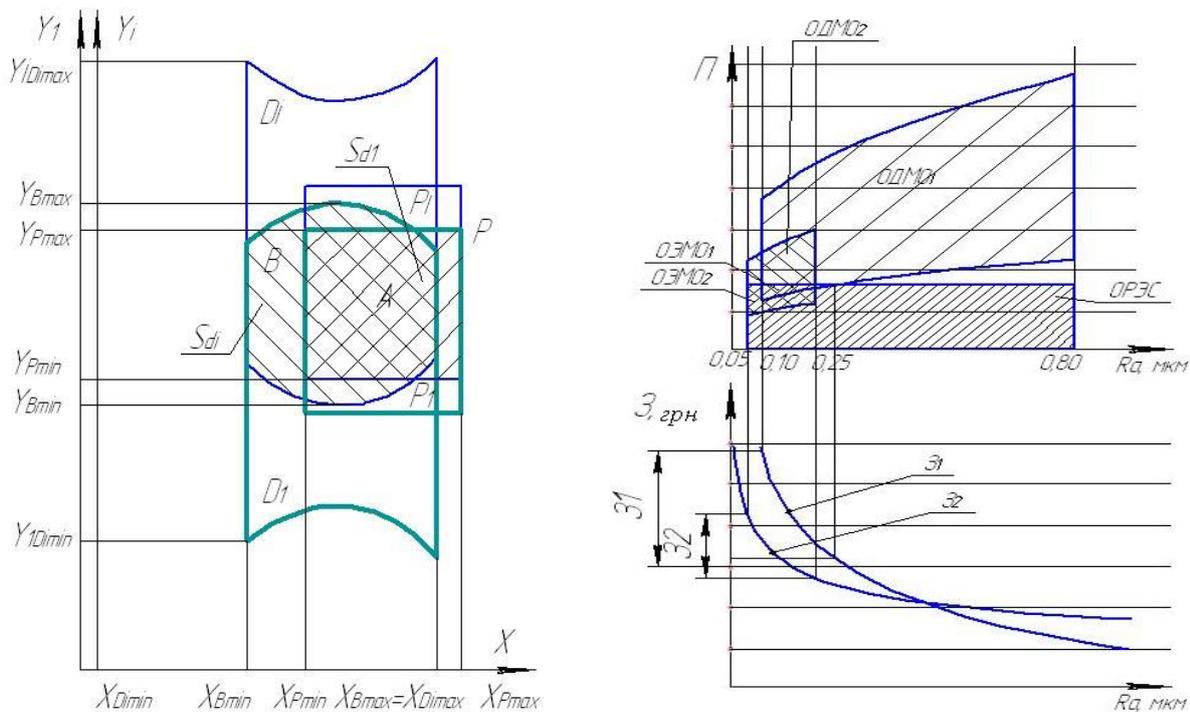


Рис. 6.54. Схема системной оптимизации обеспечения нескольких ЭС

Рис. 6.55. Схема задачи ФСА

$$S_{D_{ij}} = (K_{ij \max} - K_{ij \min}) \cdot \int_{X_{iP_{ij} \min}}^{X_{iD_{ij} \max}} f(X_i) dX_i, \quad (6.90)$$

$$S_{D_{\Sigma ij}} = \sum_{\psi=1}^e \left[K_{BD_{\Sigma ij}} \cdot f_{BD_{\Sigma ij}}(X_i) - K_{HD_{\Sigma ij}} \cdot f_{HD_{\Sigma ij}}(X_i) \right], \quad (6.91)$$

$$S_{A_{\Sigma ij}} = \sum_{\psi=1}^t \left[K_{BA_{\Sigma ij}} \cdot f_{BA_{\Sigma ij}}(X_i) - K_{HA_{\Sigma ij}} \cdot f_{HA_{\Sigma ij}}(X_i) \right], \quad (6.92)$$

где ψ – количество пересеченных множеств;

X_i – значения i – о параметра, значения которого регламентируются и откладываются на оси абсцисс (параметр качества поверхности);

K_{ij} – коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых j комплексных параметров при i – регламентируемом параметре качества поверхности;

$f_{HD_{\Sigma ij}}(X_i), f_{BD_{\Sigma ij}}(X_i)$ – приведенная к j – показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $D_{\Sigma ij}$;

$f_{HA_{\Sigma ij}}(X_i), f_{BA_{\Sigma ij}}(X_i)$ – приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область $A_{\Sigma ij}$ по регламентируемому параметру;

$K_{BD_{\Sigma ij}}, K_{HD_{\Sigma ij}}$ – приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $D_{\Sigma ij}$;

$K_{BA_{\Sigma ij}}, K_{HA_{\Sigma ij}}$ – приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область $A_{\Sigma ij}$;

e – количество образованных множеств СОДМО;

t – количество образованных множеств СОЭМО.

Для оптимизации технологического обеспечения ЭС при регламентации одновременно двух параметров качества поверхности учитываются связи между ними (6.88) и (6.89).

Эту задачу надо решать не в двумерной системе координат, а используя пространственное моделирование. В качестве примера выбрано обеспечение

ЭС с использованием комплексного параметра для поверхностей, работающих в условиях линейного износа (табл. 6.4). Графически область ОДМО можно построить при помощи математического пакета MathCAD (рис. 6.56 и рис. 6.57).

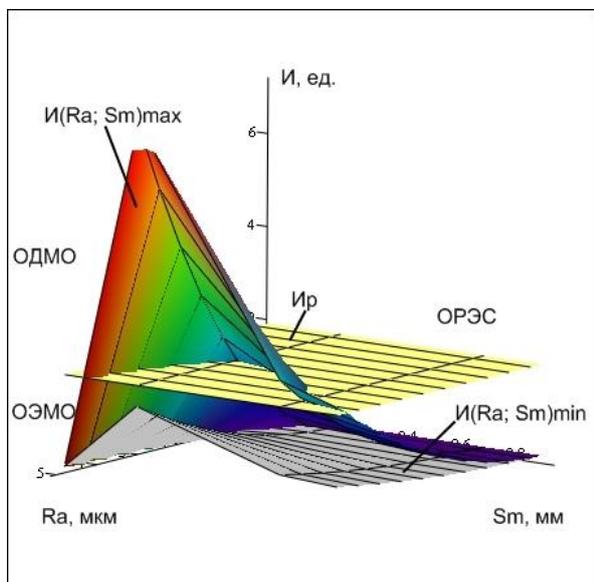


Рис. 6.56. Область ОДМО для зубообработки червячной модульной фрезой при регламентации S_m и R_a

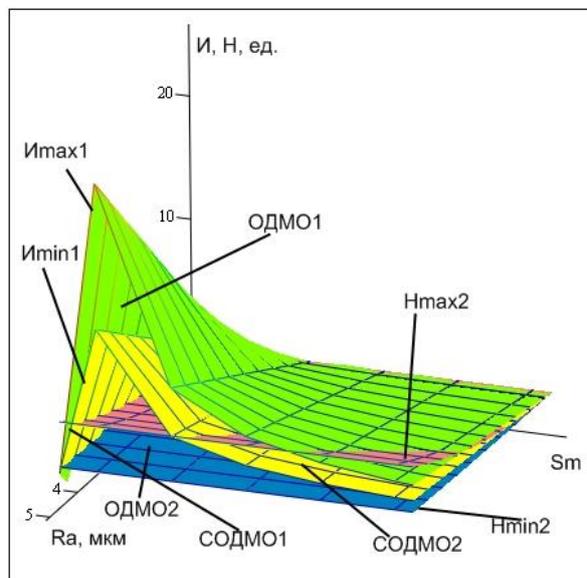


Рис. 6.57. Область СОДМО при регламентации параметров S_m и R_a

Объем области ОДМО:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ОДМО}} &= \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\max}^l} dR_a dS_m - \iint_{D_1} \frac{R_a}{S_m \cdot K_{\min}^l} dR_a = \dots \\
 &\dots = \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\max}^l} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a - \int_{R_a^{\min}}^{R_a^{\max}} \left[\frac{R_a}{K_{\min}^l} \cdot \left(\ln \frac{K_{f2} \cdot \sqrt[m]{R_a}}{K_{f1} \cdot \sqrt[n]{R_a}} \right) \right] dR_a,
 \end{aligned} \tag{6.93}$$

где, $V_{\text{ОДМО}}$ – объем области ОДМО;

K_{fi} – коэффициент корреляции;

n, m – показатели степени.

С помощью критериев оптимизации технологического обеспечения ЭС (рис. 6.53) нужно определить, удовлетворяет ли данный метод обработки на

финишном этапе максимальности значения площади области СОЭМО из всех выбранных методов, минимальности затрат (ФСА) и максимального значения вероятности $P(A)$ для данного метода обработки (блоки 9 – 14, рис. 6.54). Если нет, то следует вернуться к определению финишного этапа обработки или методу обработки на финишном этапе, а также смене регламентируемого параметра качества поверхности (блок 7, рис. 6.53).

Область ОРЭС обозначим как A , ОДМО – D , ОЭМО – B (рис. 6.55). Используя теорию множеств, автором сформулированы высказывания, отражающие критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких ЭС поверхностей деталей:

Для каждого метода зубообработки (МЗ) на финишном этапе существует ограниченный набор (множество) областей D , для каждого из которых существует функция затрат C_i .

Из множества областей B найдется такая область ОЭМО (одна), которая будет удовлетворять трем критериям:

– будет иметь максимальное значение площади пересечения ОДМО и ОРЭС (S_D);

– будет иметь минимальное значение функции затрат C_i ;

– будет иметь максимальную вероятность обеспечения ЭС для данного МЗ.

Эта область ОЭМО, удовлетворяющая вышеперечисленным критериям, будет оптимальной с точки зрения технологического обеспечения ЭС. Математически это может быть выражено следующим образом:

$$1. \forall \hat{I} \exists D \exists C;$$

$$D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_i\};$$

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\};$$

$$C_i = F(x_i);$$

$$A \cap D = B;$$

$$B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\};$$

$$B_{opt} \in B.$$

$$2.1. \exists_B B_{j\hat{m}} \cdot S_D \rightarrow \max \quad (6.94);$$

$$2.2. \exists_B B_{j\hat{om}} C_i \rightarrow \min \quad (6.95);$$

$$2.3. \exists_B V_{jonn} P_i(A) \rightarrow \max \quad (6.96).$$

Нужно помнить, что область СОЭМО является выходной информацией, необходимой для выполнения ФСА и вероятностной оценки (ВО) метода зубообработки. Не только ее площадь, но и положение в системе координат имеет существенное значение в обеспечении ЭС поверхности, так как проектирование экстремумов из этой области на функцию затрат определит величину издержек при данном методе обработки, а положение кривой распределения параметров качества поверхности по отношению к области СОЭМО определит вероятность обеспечения ЭС поверхности выбранным методом зубообработки.

Параметры качества поверхности R_p , S_m , R_a и др. представляют собой функцию случайной величины. Эти рассуждения относятся к области достижимых значений комплексного параметра при рассматриваемом методе зубообработки D , а область P является равновероятной.

Вероятность $P(A)$ для рассматриваемого метода обработки области ОЭМО может быть определена так (при независимости параметров качества поверхности; рис. 6.58):

$$P(A)_T = \frac{0,63 - 0,1}{0,8 - 0,1} - \frac{1}{0,8 - 0,1} \cdot \int_{0,385}^{0,63} dx \int_{\frac{0,016}{x}}^{0,416} f(K) dK = \dots$$

$$\dots = \frac{1}{0,7} \cdot \left[0,53 - 0,01 \int_{0,385}^{0,63} \left(\frac{x}{0,016} - \frac{1}{0,416} \right) dx \right] = 0,66 \cdot$$

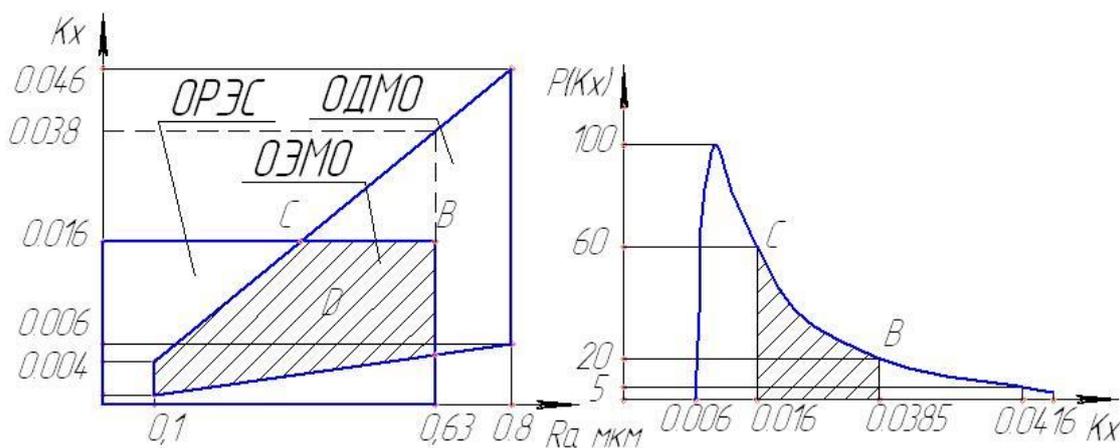


Рис. 6.58. Функция плотности вероятности $F(K)$ для зубообработки

Двумерное нормальное распределение параметров качества поверхности R_a и W_a , для случая независимости (некоррелированности) этих параметров имеет вид, приведенной на рис. 6.59.

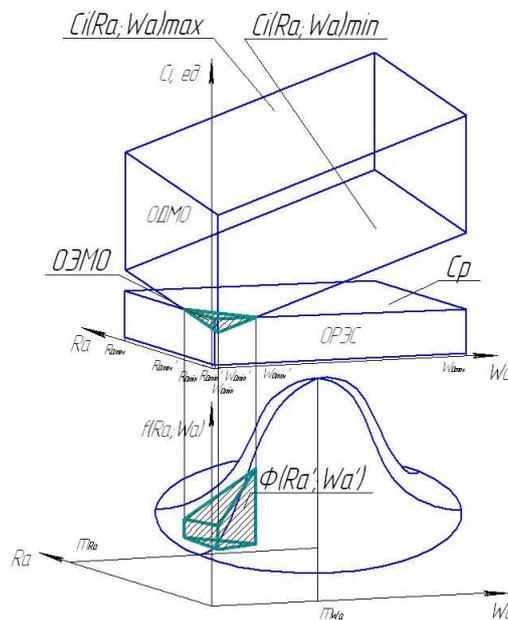


Рис. 6.59. Схема задачи выбора метода обработки при регламентации двух параметров качества поверхности

При проецировании поверхности $ОЭМО_i$ на поверхность плотности распределения эта поверхность усекается и находится в интервалах $(R_{amin}^l \leq R_a \leq R_{amax}^l)$ и $(W_{amin}^l \leq W_a \leq W_{amax}^l)$. Плотность распределения (см. рис. 6.59):

$$F(R_a; W_a) = \frac{1}{\gamma \cdot \lambda} \cdot \left\{ \Phi(R_a) - \Phi(R_{amin}^l) \right\} \cdot \left\{ \Phi(W_a) - \Phi(W_{amin}^l) \right\}, \quad (6.97)$$

где $(1 - \gamma)$ – степень усечения интервала $(R_{amin} \leq R_a \leq R_{amax})$;

$(1 - \lambda)$ – степень усечения интервала $(W_{amin} \leq W_a \leq W_{amax})$;

Φ – функция Лапласа (6.98)

$$P\{(R_a; W_a) \in D\} = \iint_D F(R_a; W_a) dR_a dW_a. \quad (6.98)$$

Для обеспечения ЭС при задании ограниченного набора параметров ка-

чества поверхности вероятность для выбранного метода зубообработки определится из (6.99)

$$P(R_{ij}) = \prod_{i=1}^n P(R_i). \quad (6.99)$$

Назначение режимов зубообработки, обеспечивающей заданные ЭС (блок 15, рис. 6.53). Для определения режимов обработки используются эмпирические уравнения параметров состояния поверхностного слоя (6.100)

$$(R_a, R_p, S_m) = f(S; \mathcal{G}; r; \gamma). \quad (6.100)$$

Для обеспечения ЭС используются ограничения вида (6.101)

$$[П] \leq П, \quad (6.101)$$

где $П$ – расчетно-конструкторское значение комплексного параметра $П$;

$[П]$ – значение комплексного параметра $П$, достижимого зубообработкой поверхности.

Таким образом, выражение (6.101) будет иметь вид (6.102)

$$\left[\frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^I)^{0,5}} \right]^{\frac{1}{3}} \leq \left[\frac{\sigma_T \cdot (J_{ПЛ.})^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}. \quad (6.102)$$

Выразив из (6.102) нерегламентируемый параметр шероховатости R_p и подставив его в соотношение (6.101) находим оптимальную скорость резания v и число оборотов шпинделя n , которая обеспечит заданные конструктором ЭС (6.103)

$$n \geq \frac{60 \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \cdot \left[K_0 \cdot W_p \cdot H_p \cdot \frac{S^{K_1}}{r^{K_2}} \cdot \left(\frac{1.7 \cdot P}{\sigma_T \cdot (J_{ПЛ.})^6 \cdot K^I} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{K_3}}. \quad (6.103)$$

Не имея информации обо всем технологическом процессе изготовления зубчатых колес, за функцию стоимости можно взять приведенные затраты на выполнение перехода (рис. 6.60), (6.104).

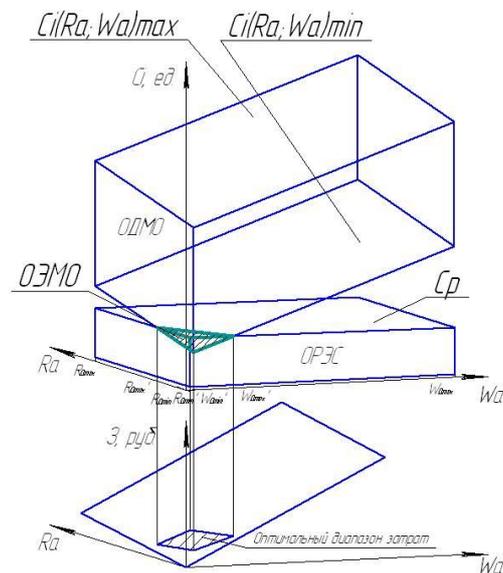


Рис. 6.60. Выбор оптимального диапазона затрат при обеспечении ЭС поверхностей зубчатых колес

$$Z = \left(\frac{t_{ш.-к_i} \cdot (C_{uf} + Z_{сэ})}{60} + \frac{Z_{II}}{N_T} \right) \cdot N_i, \quad (6.104)$$

где C_{uf} – часовая тарифная ставка f – о разряда станочника, грн;

N_i – годовая программа выпуска i – о изделия;

Z_{II} – затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости, грн;

N_T – количество зубчатых колес, обработанных за период стойкости инструмента, шт.;

$Z_{сэ}$ – затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в течении часа его работы, грн.

В свою очередь, приведенные затраты метода механической зубообработки определяются по штучно-калькуляционному времени, которое является функцией основного времени и, как следствие, частоты вращения шпинделя n и подачи $S: t = f(n; S)$. Функция затрат представляет собой зависимость двух переменных параметров качества поверхности и может рассматриваться как поверхность затрат (рис. 6.60) (например, $Z = f(H_{max}; Ra)$). Схема решения задачи ФСА представлена на рис. 6.55.

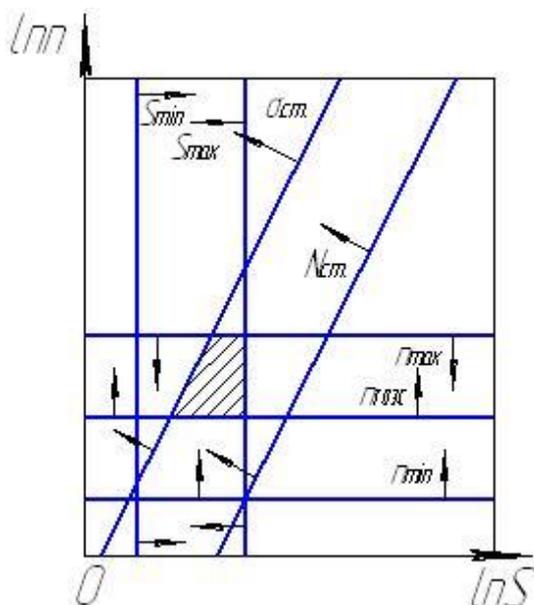


Рис. 6.61. Оптимизация режимов зубообработки

По приведенным выше зависимостям можно, на основании ограничения (6.101), провести оптимизацию режимов резания для выбранного метода зубообработки (рис. 6.61). В дополнение к ограничениям (см. рис. 6.61) подачи и чисел оборотов шпинделя по мощности привода станка, прочности его механизмов подачи и главного движения, максимальных и минимальных возможных их значений добавляется ограничение по возможности обеспечения ЭС обрабатываемой поверхности (6.98).

При регламентации не одного R_z параметра шероховатости поверхности необходимо использовать не плоские графические корреляционные зависимости этих параметров с режимами обработки, а объемные (рис. 6.62), представляющие собой поверхности в системе координат: PR_zW_z , $V_nR_zW_z$, $S_nR_zW_z$ и др.

Выбор оптимальной технологии (блок 15, рис. 6.53) изготовления является сложной многовариантной задачей.

Рассмотрены вопросы обеспечения качества закаленных крупномодульных зубчатых колес при их изготовлении за счет обеспечения ЭС их поверхностей. Приведен алгоритм двухступенчатого обеспечения ЭС поверхностей на основе применения комплексных параметров состояния поверхности и ее многокритериальной оптимизации.

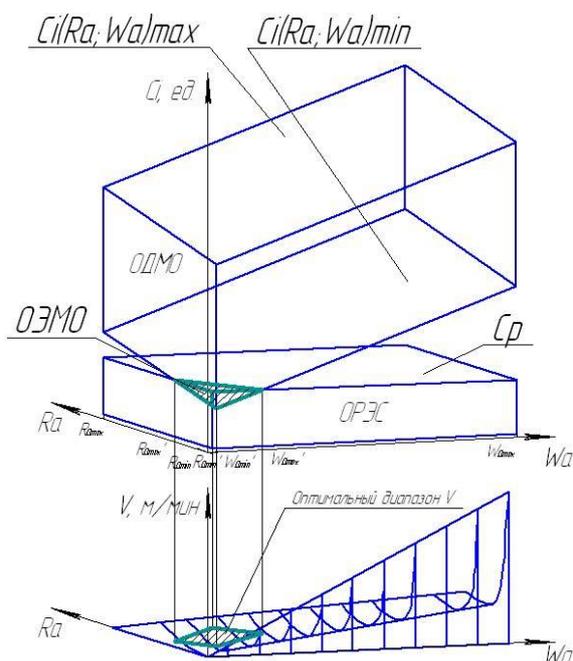


Рис. 6.62. Оптимальный диапазон скорости резания при регламентации двух параметров качества поверхности W_a и R_a

Сформулированы критерии оптимизации технологического обеспечения нескольких ЭС поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес с использованием комплексных параметров их состояния, рассмотрены вопросы назначения оптимальных режимов их зубообработки, предложены графические схемы решения этих задач.

6.4. Технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес

6.4.1. Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке

В связи с тем, что тяжелые зубофрезерные станки, изготовленные на ОАО «Коломенский ЗТС» (г. Коломна), по жесткости и быстроходности не предназначены для работы методом обкатки твердосплавными червячными фрезами, а также из-за сравнительно невысокой стойкости используемых отечественных твердых сплавов производственный опыт ряда заводов показал, что точность обработки крупномодульных и закаленных до $HRC, 50...55$ колес модулем $m > 12$ мм червячными твердосплавными фрезами по нормам плавности и контакта не превышает 9...10 – й степеней точности по ГОСТ1643 – 81.

Поэтому для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых немодульных фрез (размеры фрезы не зависят от модуля), оснащенных керамическими пластинками, и специальных фрезерных суппортов. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом обкатки, с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, с учетом радиуса округления ρ мм, обеспечивать процесс резания.

Для обеспечения оптимальной долговечности и технологической надежности процесса формообразования зубчатых закаленных колес немодульными фрезами необходимо придавать обработанным поверхностям наиболее выгодные геометрические характеристики и физико-механические свойства. Эксплуатационные свойства зубчатых колес зависят от точности обработки, марки материала, его структуры и твердости, а также шероховатости поверхностей в зависимости от способа или метода их получения [32, 38, 94].

При механической обработке зубьев закаленных колес скоростным резанием немодульными фрезами поверхностный слой подвергается пластическому деформированию и местному кратковременному нагреву. В этом слое возникают остаточные напряжения, которые имеют значительную величину.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе обработки поверхностей зубчатых колес одним из его результатов является образование равновесной шероховатости. Несущая способность поверхности зубчатых колес, коэффициент трения и интенсивность износа при трении скольжения, наряду с шероховатостью, определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения), видом обработки и технологическими особенностями конструкции немодульных фрез. Поэтому образующаяся шероховатость поверхностей будет

зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя инструмента и обрабатываемой поверхности зубчатых колес.

Кроме того, при этом методе частота вращения инструмента не связана кинематически с частотой вращения заготовки, что позволяет использовать в качестве режущих материалов керамику и сверхтвердые материалы, т.е. увеличить скорость резания в 3 ... 4 раза (до 5 ... 8 м/с) и обеспечить повышение производительности обработки при высоком качестве обработанной поверхности зубьев. Обработка проходит при увеличенном, по сравнению с червячной фрезой, количестве резов, профилирующих эвольвентную поверхность зубьев, что формирует высокую их точность и низкую шероховатость [93, 97, 99].

Для разработки схем резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке изучен методами численного моделирования процесс формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и рекомендовать оптимальный технологический регламент обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

На основании выполненных работ разработана математическая модель технологического процесса встречного зубофрезерования с переменным изменением формообразования поверхностного слоя. Модель предназначена для исследования пластического течения металла в зоне стружкообразования, расчета скоростей деформации, напряжений в условной плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента, исследования напряжений в слоях металла, расположенных на различной удаленности от обработанной поверхности, создания базы для изучения нестационарных процессов: врезания инструмента, прерывистого резания, напряжений в условиях элементного и псевдоэлементного стружкообразования и т.п.

Численное моделирование процесса встречного зубофрезерования рас-

смотрено в двумерной динамической постановке с использованием лагранжа описания движения среды. Метод решения задачи аналогичен известному конечно-разностному методу НЕМР, поэтому система уравнений Прандтля-Рейса записывается в том же виде.

Уравнения движения (6.105)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} &= \rho \dot{u}_x, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} &= \rho \dot{u}_y, \end{aligned} \right\} \quad (6.105)$$

уравнение неразрывности (6.106)

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial u_x}{\partial X} + \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad (6.106)$$

уравнение энергии (6.107)

$$\dot{E} = -P\dot{V} + (S_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + 2S_{xy}\dot{\epsilon}_{xy})V. \quad (6.107)$$

Скорости деформации (6.108)

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial X}, \\ \dot{\epsilon}_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, \\ \dot{\epsilon}_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial X} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6.108)$$

В условиях плоской деформации $u_2 = 0$, $v_{ii} = e_{y2} = 0$, скорость вращения

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{xy} = -\dot{\omega}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial X} \right). \quad (6.109)$$

Полная деформация включает в себя упругую и пластическую части (6.110)

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{pl}. \quad (6.110)$$

Тензор напряжений σ разбивается на девиаторную s – шаровую P части. Девиатор напряжений с учетом поворота локальной системы координат (6.111)

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{xx} &= 2\mu \left(\dot{S}_{xx} - \frac{1}{3} \dot{V} / V \right) + \varpi_{xx}, \\ \dot{S}_{yy} &= 2\mu \left(\dot{S}_{yy} - \frac{1}{3} \dot{V} / V \right) + \varpi_{yy}, \\ \dot{S}_{xy} &= 2\mu (\dot{\varepsilon}_{xy}) + \varpi_{xy}, \end{aligned} \right\} \quad (6.111)$$

где ϖ – поправка, учитывающая поворот элемента среды.

Гидростатическое давление определяется из (6.112)

$$\dot{P} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (6.112)$$

где $V = \rho_0 / \rho$ – относительный объем.

Условие пластичности Мизеса оперляется неравенством (6.113)

$$2J_2 - \frac{2}{3} Y^2 \leq 0, \quad (6.113)$$

где $2J_2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$,

Y – предел текучести при растяжении.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации W^{pl} (6.114)

$$Y = Y(W^{pl}) = Y_0 + \alpha (W^{pl})^\beta M, \quad (6.114)$$

где x, y – пространственные координаты;

u_x, u_y, u_z – компоненты вектора скорости;

s_y – компонента тензора деформации;

c_y – компонента тензора напряжений;

s_y – компонента девиатора напряжений;

P – давление;

E – удельная энергия;

ρl – плотность;

ζ_0 – первоначальная плотность среды;

$V_{отн}$ – относительный объем;

K – модуль объемного сжатия;

μ – модуль сдвига.

Точка сверху означает производную по времени.

В основу разработанной программы положены научные основы стабилизационных или искусственных вязкостей.

Отделение срезаемого поверхностного слоя осуществлялось с использованием специального алгоритма разделения узлов сетки (рис. 6.63).

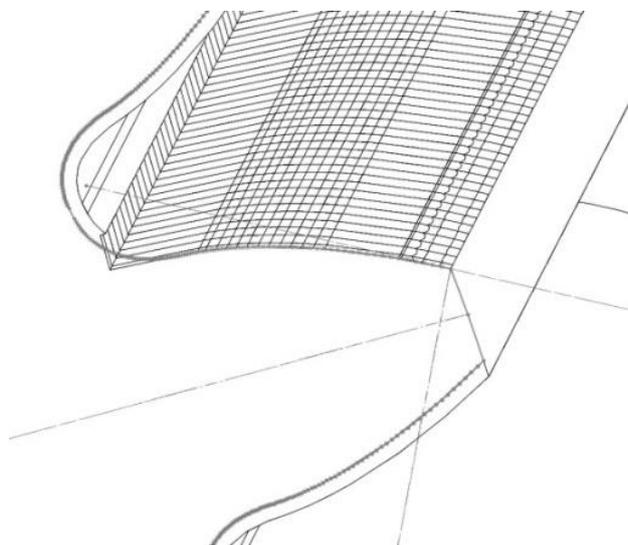


Рис. 6.63. Моделирование следа фрезы при формообразовании поверхности зубчатого колеса

Решение задачи, используются условия свободных поверхностей.

2. Расчет контактного взаимодействия поверхностей (условие непроникновения и закон скольжения Амонтона – Кулона) и коррекция движения в соответствии с взаимодействием.

Реализация граничных условий в области контакта материала с режущим инструментом осуществлялась по схеме коррекции движения узлов расчетных ячеек.

Процедура расчета на каждом временном интервале, включала следующую последовательность операций:

1. Расчет движения узлов сетки (рис. 6.64) при соответствующих граничных условиях. На всех поверхностях, где эти условия

3. Расчет напряженно-деформированного состояния в ячейках сетки.

4. Проверка условия разрушения и формирование новых поверхностей (разделение узлов и задание соответствующих условий на новых поверхностях для отделения срезаемого слоя).

Решение осуществлялось с учетом технологического процесса моделирования формообразования поверхностного слоя и стружки. Поскольку характерное время процесса зубофрезерования значительно превышает время прохождения волн деформации, решение задачи производилось для различных временных интервалов.

Процесс формообразования зубчатых колес при встречном фрезеровании методами численного моделирования заключается в получении минимального значения угла скольжения $\Psi_{ск}$ или получения максимального значения $\sin \psi_{ск\min}$, при котором процесс резания отсутствует с учетом варьирования переменных параметров режимов резания (S_{\min} , V) и геометрических параметров зуборезных фрез (ρ , $d_{фр}$, Z).

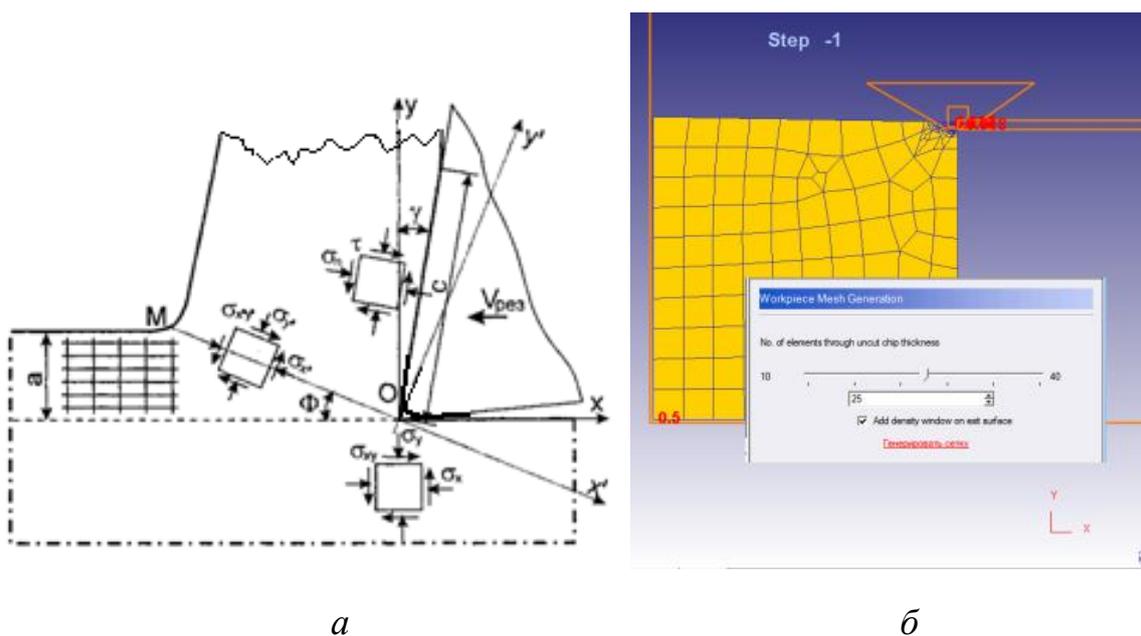


Рис. 6.64. Схематическое изображение процесса формообразования – *а* и процедуры разделения узлов сетки вдоль линии среза – *б*

Соотношение между углом скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшим углом контакта зуба фрезы Ψ_{\max} с обрабатываемой поверхностью позволяет установить

эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя K_p .

Использовались следующие константы обрабатываемого материала: $K = 180$ ГПа, $\mu = 80$ ГПа, $\rho = 7,85$ г/мм³, $Y_0 = 0,4$ ГПа, $a = 1/150$, $\beta = 0,2$. Расчеты проводились для скорости резания $V = 3,0$ м/с.

На рис. 6.65 приведено полученное при исследовании модели распределение интенсивности напряжений в зоне стружкообразования при зубофрезеровании.

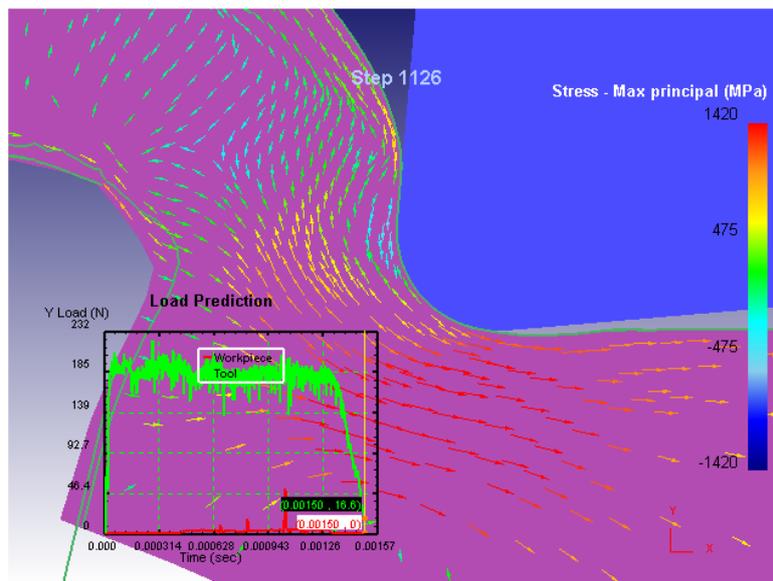


Рис. 6.65. Распределение интенсивности напряжений в области формообразования поверхностного слоя

Пластическое течение материала сосредоточено вблизи условной плоскости сдвига и передней грани инструмента. На рис. 6.65 также достаточно четко просматриваются зоны упругого сжатия впереди зуба фрезы и растяжения под задней поверхностью зуба фрезы.

Известно, что поведение материала, не обладающего свойствами деформационного упрочнения (или описываемого в таких рамках), имеет тенденцию к локализации пластической деформации. В связи с этим использование данной модели может оказаться полезным для выделения наиболее активной зоны деформации.

Пластическое течение материала начинается значительно раньше, чем

частицы металла оказываются на условной плоскости сдвига, угол наклона которой существенно меньше (рис. 6.65).

Напряженное состояние не является неизменным в течение процесса. Как физически, так и численно это обусловлено неравномерностью разрушения материала перед зубом фрезы с учетом угла скольжения $\Psi_{ск}$. Очевидно, что дискретизация этого процесса связана с технологией численного расчета и значительно усиливает неравномерность. В момент разделения очередного узла сетки происходит разгрузка материала в прилегающей области и излучение упругих волн. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига показано на рис. 6.66. Понятно, что в такой ситуации уровень напряжений вблизи лезвия будет циклически меняться, а картина распределения напряжений зависит от местоположения лезвия инструмента в пределах расчетной ячейки, т.е. от момента времени. Именно с этим связана нестабильность процесса формообразования.

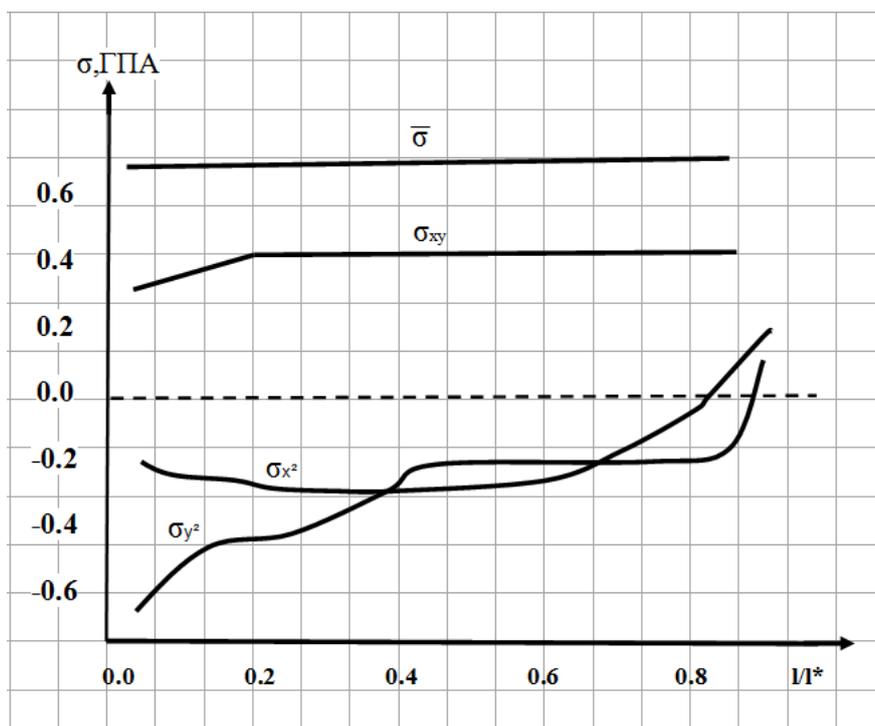


Рис. 6.66. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига

На рис. 6.66 представлены результаты расчета напряжений, действующ-

щих на условной линии сдвига, на рис. 6.67 – изменение интенсивности скорости деформации частиц металла на пути превращения их в стружку. Изменение интенсивности скорости деформации $\dot{\epsilon}$, вначале плавно, а затем вблизи условной линии сдвига резко возрастает, после чего падает до нуля.

Наибольшая скорость деформации имеет место в слое, прилегающем к лезвию инструмента (кривая 4, рис. 6.67), наименьшая – в срединных слоях.

Однако после прохождения условной линии сдвига, скорость деформации по всему сечению остается близкой к ее величине в срединных слоях при прохождении условной плоскости сдвига. При этом отрезок времени активной деформации существенно превышает период наиболее высокоскоростной пластической деформации [103].

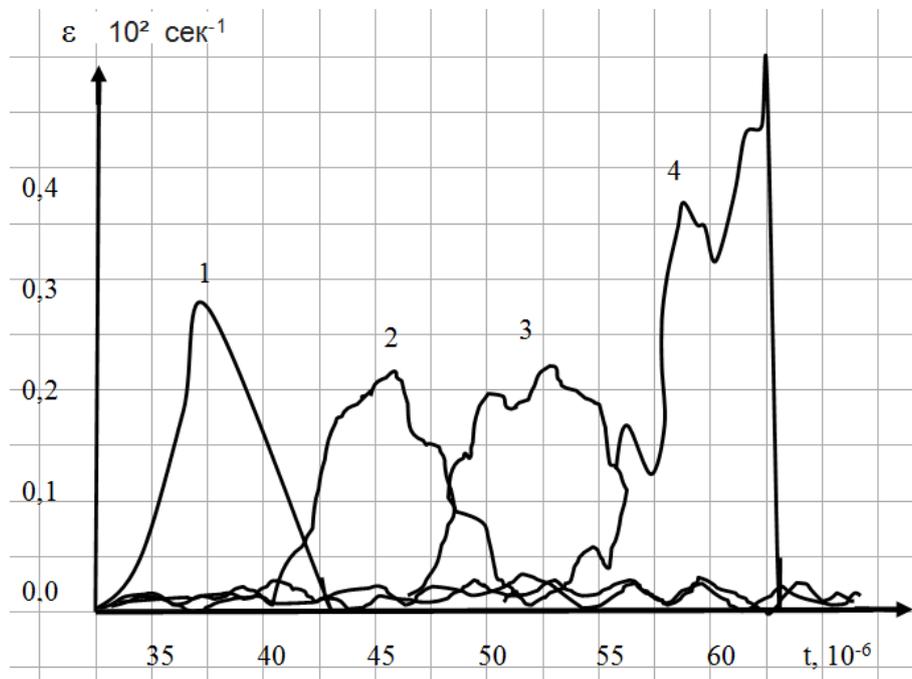


Рис. 6.67. Изменение интенсивности скорости деформации с течением времени

Сжатие материала, которое наблюдается в области, лежащей впереди зуба фрезы, сменяется интенсивным растяжением при приближении лезвия инструмента; это хорошо видно на рис. 6.68. Если вертикальная компонента напряжений (в силу граничных условий) после прохождения резца обращается в ноль (рис. 6.68, б), то для горизонтальной составляющей ситуация значительно отличается. Верхние слои уже обработанной детали вновь оказываются

ся в состоянии сжатия (рис. 6.68, а).

В разработанной численной модели в качестве установочных параметров были использованы исходная геометрия инструмента, коэффициент трения и свойства материала заготовки.

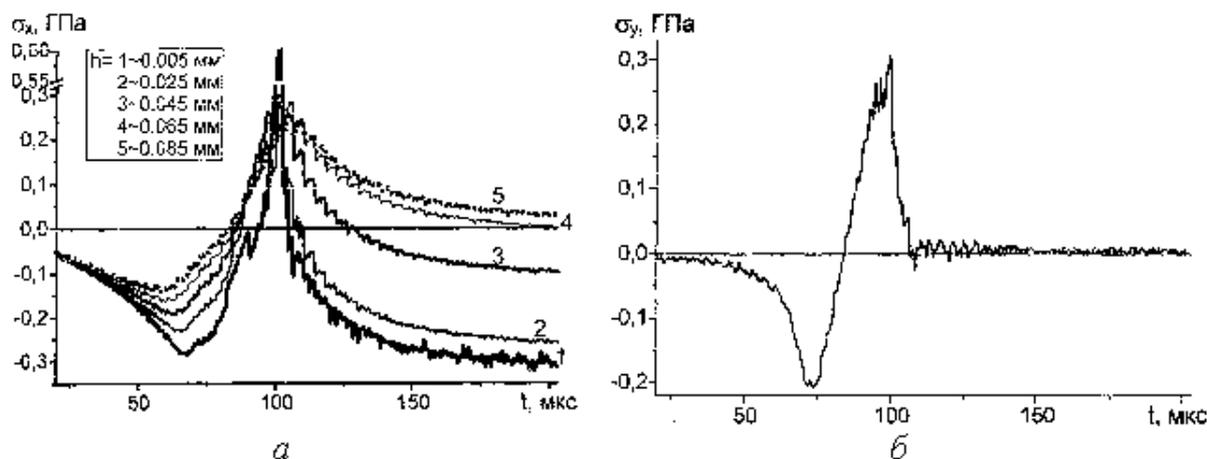


Рис. 6.68. Изменение напряжений: а – по глубине поверхностного слоя; б – с течением времени по мере перемещения зуба фрезы

К числу модельных идеализаций относятся переменная толщина срезаемого слоя, радиус округления режущего лезвия и соответствующая схема отделения срезаемого слоя; модель упругопластического поведения материала.

Разработанная на основании проведенных исследований численная модель достаточно хорошо описывает многие явления процесса зубофрезерования. Возможно и дальнейшее уточнение расчетов путем учета влияния температуры, задания переменного закона трения на передней грани и т.п.

Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным.

Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа [99].

При реализации технологии лезвийной обработки закаленных колес ин-

струментами дискового типа предложены схемы резания I и II (рис. 6.69, а, б).

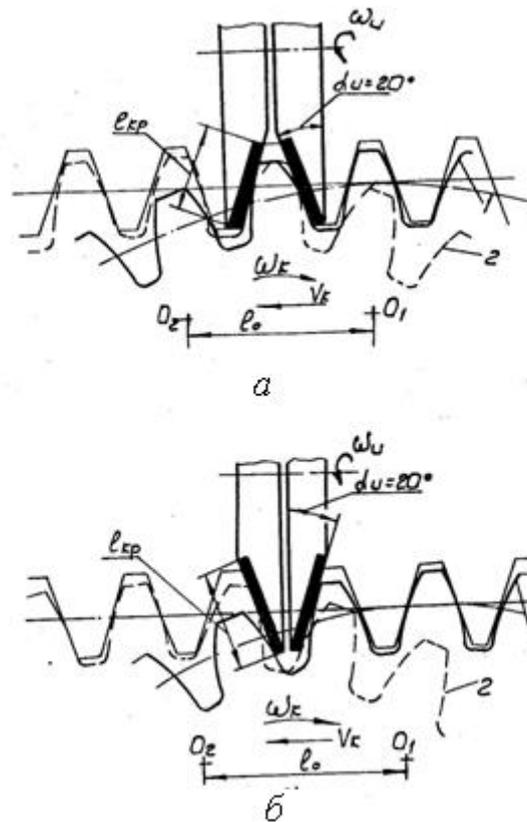


Рис. 6.69. Технологические схемы резания дисковыми немодульными фрезами

Общим недостатком схем I и II является то, что в обоих случаях размеры режущих кромок зубьев $l_{кр}$ инструмента зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса. При крупном модуле зубьев $m = 18...36$ мм размеры кромок составляют $l_{кр} = 45...90$ мм. Это усложняет процесс припоя твердосплавных зубьев и последующее затачивание инструмента или оснащение его керамикой и сверхтвердыми материалами. Инструмент такой конструкции имеет сравнительно большие периметры резания, что повышает силы резания и способствует возникновению вибраций.

Достоинство схем I и II в том, что оба инструмента расположены на одной и той же оправке, т.е. имеется возможность осуществить привод враще-

ния от одного электродвигателя.

При схеме III (рис. 6.70, а) в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам PK , расположенная горизонтально.

Профильный угол зубьев инструмента – дисковой фрезы близок к $\alpha_u = 0^\circ$. Фреза в первоначальный момент обработки расположена со смещением относительно оси колеса на расстоянии l_0 , определяемом по следующей зависимости:

$$l_0 = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (6.115)$$

где r_b – радиус основной окружности зубьев;

α_a – угол профиля эвольвенты на вершине зуба.

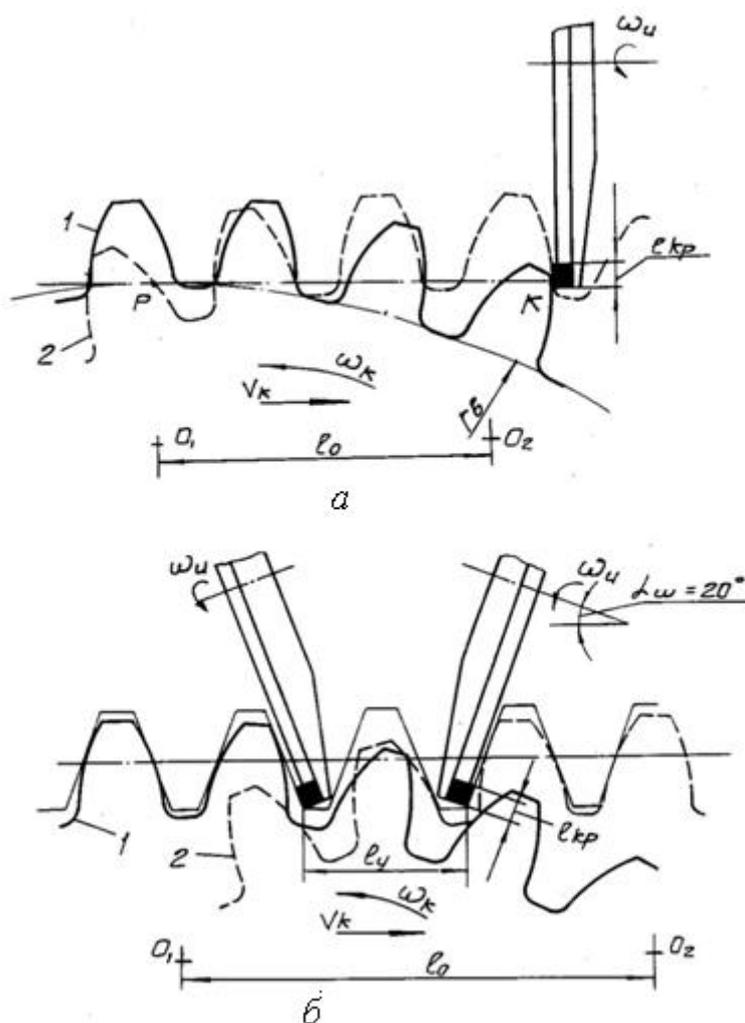


Рис. 6.70. Перспективные технологические схемы скоростного зубофрезерования: а – схема резания III; б – схема резания IV

Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется отдельно, обработка ведется за два прохода.

Схема резания IV (рис. 6.70, б) предполагает одновременную обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол $\alpha_u = 20^\circ$. Профильный угол зубьев фрезы равен $\alpha_u = 0^\circ$.

Инструменты располагают с охватом одного или нескольких зубьев колеса. Однако с ростом числа зубьев в охвате увеличивается и путь обката, что снижает производительность обработки.

Для обработки зубчатых колес различного модуля необходимо регулировать установочное расстояние l_y между фрезами, которое ориентировочно можно определить по (6.116)

$$l_y = 3,98 \cdot m. \quad (6.116)$$

Возможна разновидность схемы IV, которую назовем схемой V, когда обработка правой и левой поверхностей зубьев производится отдельно путем установки на оправке вначале одной, например, левой фрезы, а затем правой. Обработка колеса производится в два прохода.

Достоинство схем резания III, IV, V по сравнению со схемами I, II заключается в возможности использования инструментов, размеры режущих кромок которых не зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса и значительно, в 3...7, раз меньше, чем размеры кромок инструментов, рассмотренных в раболте.

При схемах I и II режущие кромки инструментов полностью задействованы в обработке, точка контакта лезвия и зуба колеса перемещается по всей длине кромки. В этих условиях оснащение всего периметра режущей кромки керамическими пластинками из-за разности их размеров не позволит получить профиль зуба достаточно высокой степени точности.

Применение схем резания III, IV, V позволяет оснастить дисковые фрезы

4-гранными керамическими пластинками марки ВОК-71 с размерами $12,7 \times 12,7$ мм. Инструмент при этом не требует затачивания и перетачивания, удобен в эксплуатации и ремонте. Так как обработка эвольвентных поверхностей зубьев производится практически одними и теми же участками пластин, то это повышает точность обработки профиля зубьев.

В табл. 6.4 представлены расчетные значения длины пути обката, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев $z_k = 25 \dots 100$ при модуле $m = 28$ мм.

В табл. 6.5 представлены изменения параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев $z_k = 25 \dots 100$ при модуле $m = 28$ мм.

Таблица 6.4 – Расчетные значения длины пути обката

Схема резания	Путь обката l_0 , мм			
	Число зубьев колеса Z_k			
	25	50	75	100
I	218,1	218,1	218,1	218,1
II	213,9	229,0	233,7	239,4
III	296,4	308,2	313,2	316,2
IV	301,8	316,9	321,4	327,3
V	278,4	289,6	294,3	297,1

Как видно из представленных в таблице данных, наименьший путь обката, а следовательно, и наибольшую производительность обработки обеспечивает схема резания I. Для этой схемы путь обката не зависит от числа зубьев обрабатываемых колес. Второй по производительности процесса является схема II. Однако эти схемы не позволяют использовать инструмент с уменьшенными размерами режущих кромок.

Таблица 6.5 – Изменение параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования

Схема резания	Параметры точности зубчатых колес, мкм
	ГОСТ 1643-81

	Нормы кинематической точности F_r	Нормы плавности $\pm f_{pt}$	Нормы бокового зазора F_β	Шероховатость поверхности, R_a	Параметр плавности $\pm f_{pt}$ после года эксплуатации
I	45	36	30	1,6	96
II	42	38	35	1,6	84
III	34	30	25	1,2	58
IV	36	28	26	1,1	50
V	32	30	25	1,4	56

Из схем резания для дисковых фрез, оснащенных минералокерамикой (III, IV), наиболее эффективной является схема IV. Здесь путь обката наименьший, но необходимо учитывать величину вспомогательного времени, связанного с переустановкой инструмента и подналадкой заготовки колеса.

Схема III является второй по эффективности. Недостаток ее в том, что из-за большого исходного смещения инструмента относительно оси колеса на существующих станках ОАО “КЗТС” (г. Коломна) возможна обработка косозубых колес только с наружным диаметром до 800 мм. Схема IV удобна в эксплуатации, т.к. не требует переустановки фрез.

В ПАО “НКМЗ” также параллельно проводились работы по освоению технологии чистовой зубообработки закаленных колес на станках фирмы “MAAG” с использованием спецсуппорта и дисковых фрез, оснащенных керамикой. Основной идеей проводимых работ было проектирование, изготовление на ПАО “НКМЗ” и внедрение специального зубофрезерного станка для чистовой обработки закаленных колес, однако идея была реализована только на уровне рабочего проекта станка.

В данной работе были приняты два направления. Первое заключалось в разработке несложных по конструкции специальных фрезерных суппортов, устанавливаемых на зубострогальных станках фирмы “MAAG” и реализующих схему резания III (рис. 6.70, а). Второе учитывало крайне малое число заводов, имеющих станки фирмы “MAAG”, и поэтому предусматривало совместно с ОАО “КЗТС” (г. Коломна) разработку, изготовление и внедрение на заводах отрасли специальных фрезерных суппортов к широко распространенным вертикально-зубофрезерным станкам. При этом реализовывались

технологические схемы резания III и IV.

6.4.2. Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания

Для чистовой обработки закаленных колес на станках фирмы «MAAG» разработаны две конструкции специальных фрезерных суппортов: одношпиндельная, реализующая схему III, и двухшпиндельная, реализующая схему резания IV [38, 66, 67, 94].

Одношпиндельный суппорт (рис. 6.71, 6.72) состоит из опорной плиты 1, шпинделя 2, оправки 3, шпонки торцевой 4, крепежных винтов 5, электродвигателя 7, клиноременной передачи 8. Дисковая фреза 6 закрепляется консольно на оправке 3. Фрезерный суппорт устанавливается на ползуне станка взамен суппорта, несущего зубострогальную гребенку. В зависимости от того, какую сторону зубьев необходимо обработать, на суппорте устанавливаются фрезу леворежущую или праворежущую.

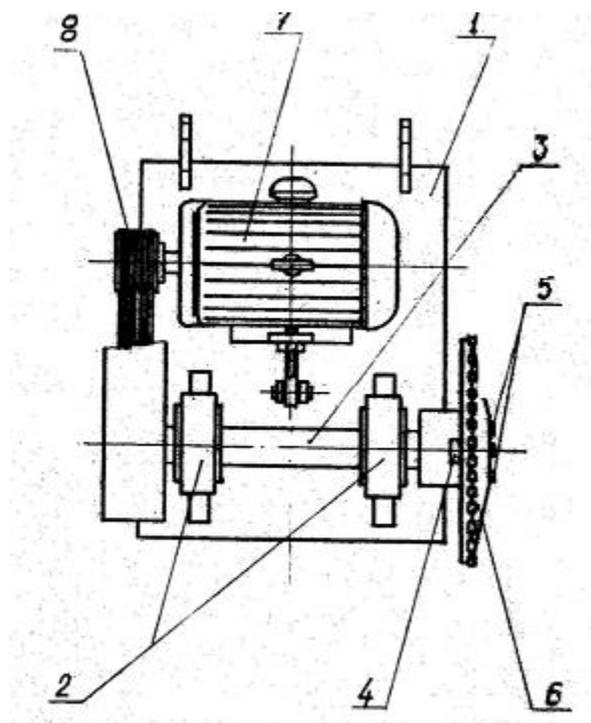


Рис. 6.71. Принципиальная схема одношпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку фирмы «МААГ»

В процессе обработки дисковая фреза совершает возвратно-поступательное движение вверх – вниз аналогично движению зубострогальной гребенки. После обработки одной боковой поверхности всех зубьев колеса, на суппорте меняется, например, леворежущая фреза на праворежущую, изменяется направление вращения и ход колеса на обратные, и производится обработка другой боковой поверхности зубьев.

Двухшпиндельный суппорт состоит из двух шпиндельных головок (рис. 6.73), каждая из которых имеет независимый привод и наклонена на угол $\alpha_0 = 20^\circ$. Левая головка неподвижно закреплена на установочной плите. Правая головка перемещается в направляющих при помощи ходового винта в направлении, параллельном движению заготовки.

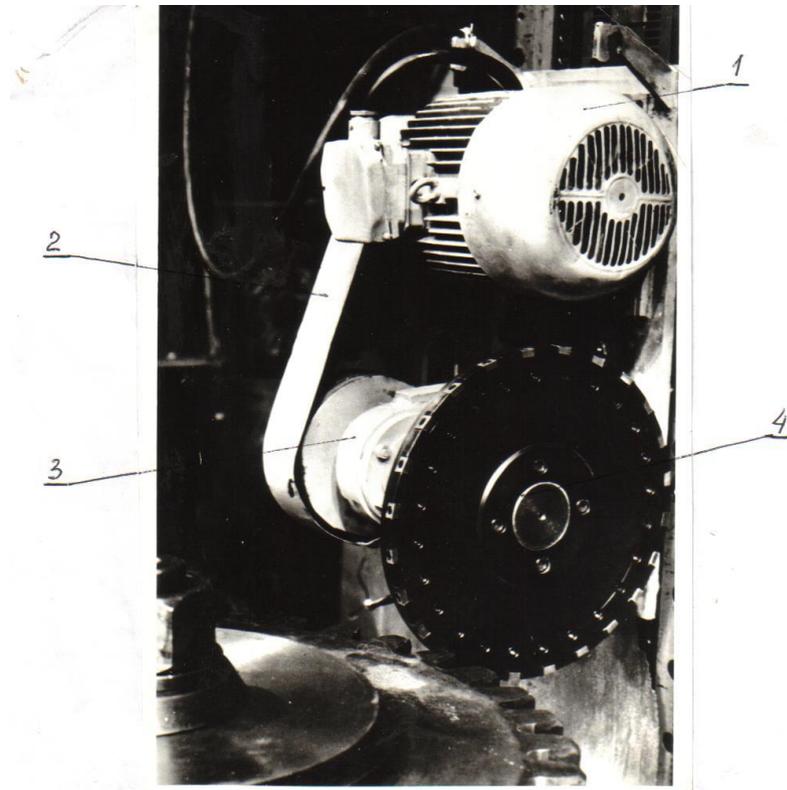


Рис. 6.72. Рабочая конструкция одношпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку фирмы «МАОГ»: 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – шпиндель; 4 – дисковая фреза, оснащенная керамикой

Дисковые фрезы $\varnothing 400$ мм приводятся во вращение электродвигателями мощностью $P = 1,5$ кВт посредством червячных пар с передаточным отноше-

нием $u = 4,75$. Частота вращения дисковых фрез составляет 300 об/мин. Расстояние между дисковыми фрезам выбирается в зависимости от модуля обрабатываемого зубчатого колеса и изменяется в пределах от 75 мм до 150 мм. В качестве смазки червячной пары применяется нелегированное масло цилиндрическое марки 52 по ГОСТ 6411-76.

На рис. 6.74 показана принципиальная конструкция одношпиндельного спецсуппорта к станку мод. 5А342. Суппорт состоит из основания 1, присоединяемого к колонне станка, поперечной траверсы 2, на которой размещена инструментальная каретка 3 с индивидуальным приводом 4 и дисковой фрезой 5. Тангенциальное перемещение V_m траверсы 2 осуществляется с помощью ходового винта 6, а возвратно-поступательные перемещения вверх-вниз каретки 3 с инструментом осуществляются с помощью высокомоментного электродвигателя и шариковой винтовой пары (ШВП) 8.

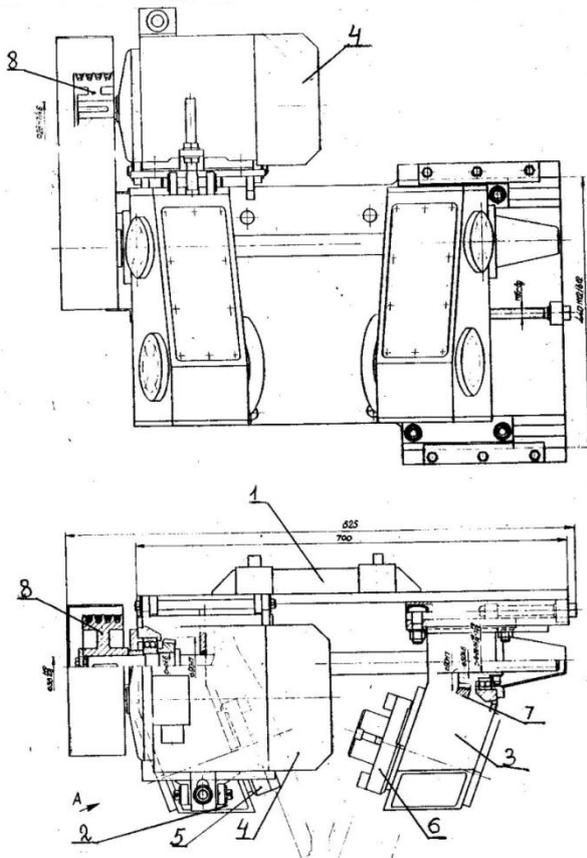


Рис. 6.73. Конструкция двухшпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку

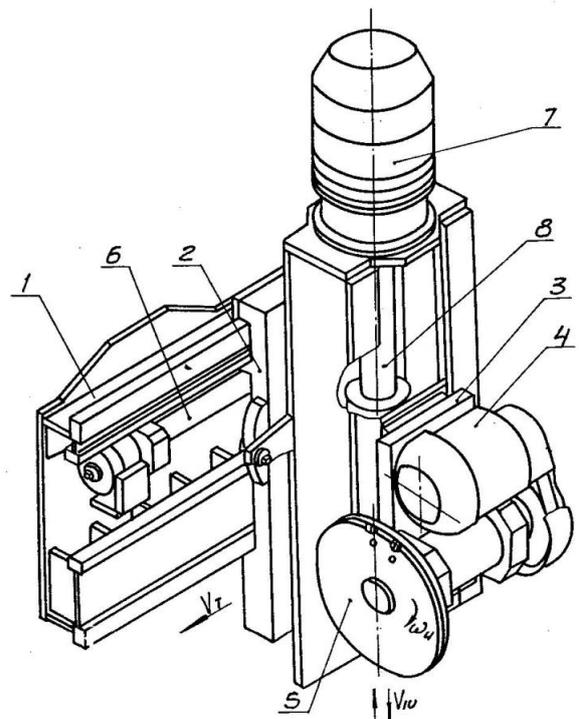


Рис. 6.74. Конструкция одношпиндельного спецсуппорта к вертикально-зубофрезерному станку мод. 5А342

Отличительными особенностями спецсуппорта к станку мод. 5343 являются (рис. 6.75) наличие двух шпинделей 1 и 2, расположенных по отношению к основанию 3 под углом $\alpha_0 = 20^\circ$, и увеличенная длина направляющих траверсы 4, позволяющая обработать зубчатые колеса с длиной зуба $b = 1500$ мм.

Каждая из двух дисковых фрез 5 и 6 имеет индивидуальные приводы 7 и 8, а расстояние между ними регулируется с помощью установочных винтов 9 и 10. Суппорт позволяет обрабатывать улучшенные и закаленные зубчатые колеса с модулем зубьев до $m = 50$ мм, углом наклона зубьев до $\beta = 15^\circ$ и наружным диаметром до $D_a = 3000$ мм.

Оба суппорта предполагалось использовать на ОАО «СЗТМ» (г. Сызрань) в первую очередь для чистовой обработки закаленных колес и приводных шестерен рудо – и углеразмольных мельниц взамен зубошлифования и с целью исключения кооперации производства или приобретения импортного дорогостоящего зубошлифовального оборудования.

6.4.3. Оснащение интенсивной и высококачественной зубообработки закаленных колес скоростными дисковыми немодульными фрезами, оснащенными керамикой

Дисковая фреза (рис. 6.76) одностороннего резания состоит из корпуса 1, на периферийной поверхности которого выполнены пазы под пластинки. В пазы вставлены керамические режущие пластинки 2 (форма 03131 по ГОСТ 25003-81, материал ВОК-71 по ГОСТ 26630-85), которые закрепляются в корпусе посредством прижимов 3 и винтов 4. Кольцо 5, служащее для базирования режущих пластинок, крепится к корпусу 1 винтами 6 [38, 94, 103].

Для обработки зубчатого колеса – правой или левой боковых поверхностей зубьев – устанавливают и закрепляют в специальном суппорте соответ-

ственно правую или левую фрезу. Фреза крепится к шпинделю специального суппорта четырьмя винтами М12. Крутящий момент от шпинделя к фрезе передается двумя торцевыми шпонками. После обработки одной боковой поверхности всех зубьев колеса левая фреза на спецсуппорте меняется на правую. Изменяется направление вращения и направления хода колеса на обратные и производится обработка другой стороны зубьев колеса.

Для устранения переустановок дисковых фрез на спецсуппорте разработана дисковая фреза двухстороннего резания (рис. 6.77), позволяющая вести обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса. Отличительной особенностью фрезы двухстороннего резания является наличие второго ряда режущих пластин (рис. 6.77), смещенных относительно первого ряда на половину окружного шага. В процессе обработки вначале одним рядом пластин обрабатывают одну из боковых поверхностей зубьев колеса, например, правую, а затем, после реверса колеса и направления тангенциального перемещения каретки с инструментом, обрабатывают вторую – левую боковую поверхность.

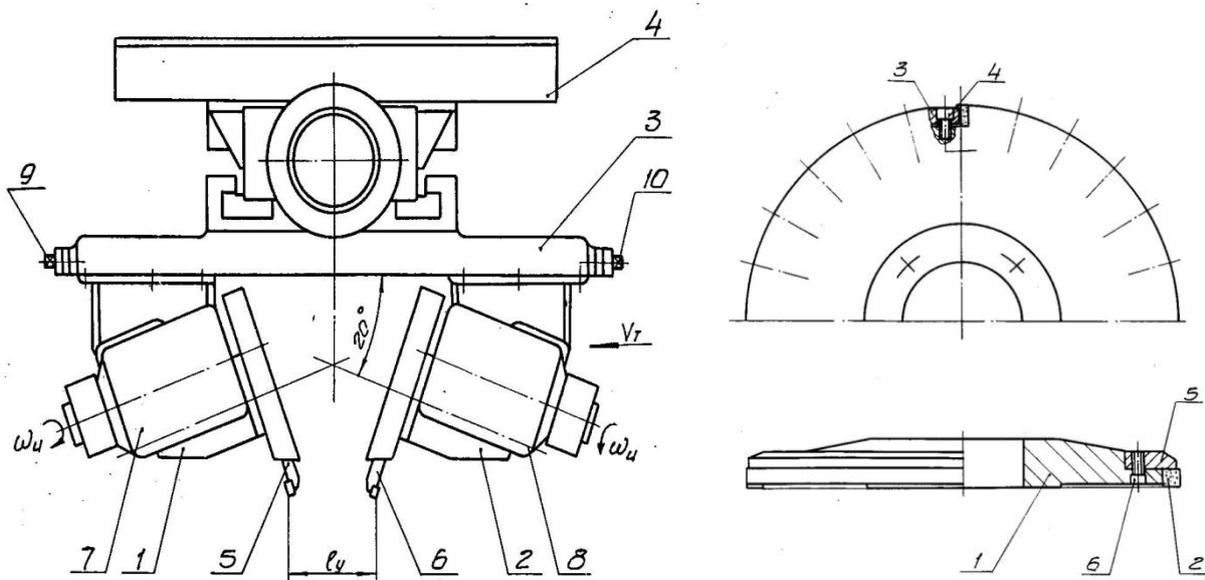


Рис. 6.75. Конструкция двухшпindelного спец. суппорта к зубофрезерному станку мод. 5343

Рис. 6.76. Дисковая фреза одностороннего резания

Такая конструкция дисковой фрезы позволяет сократить номенклатуру зуборезного инструмента и экономить вспомогательное время на переустановку фрезы. На рис. 6.78 и 6.79 показаны конструкции дисковых фрез.

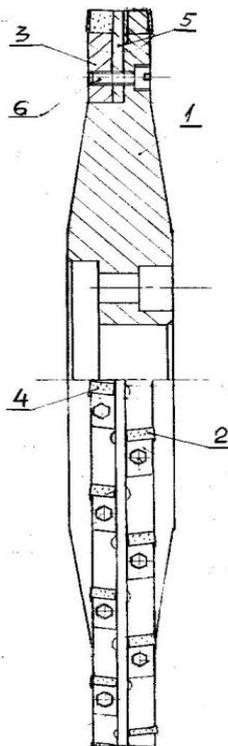


Рис. 6.77. Дисковая фреза двухстороннего резания

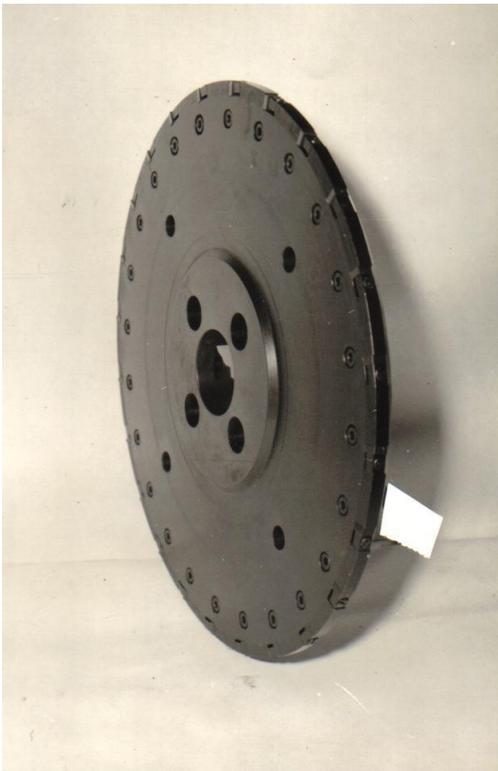


Рис. 6.78. Конструкция дисковой фрезы одностороннего резания $t = 12 \dots 36$ мм

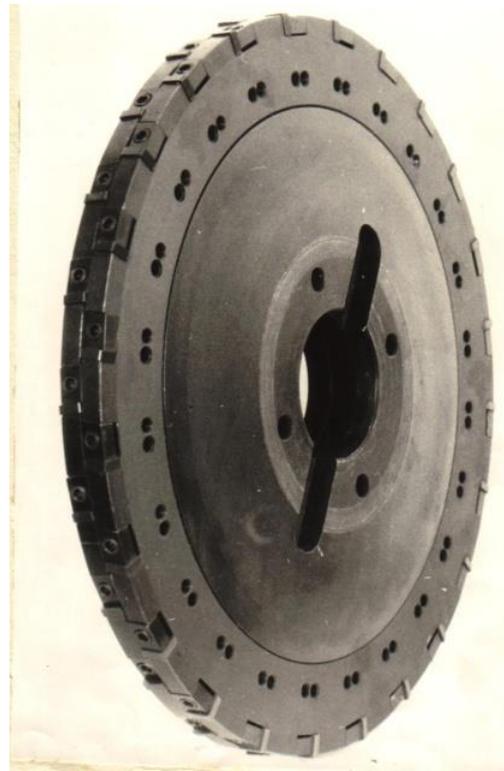


Рис. 6.79. Конструкция дисковой фрезы двухстороннего резания $t = 20 \dots 36$ мм

Вопросы для самоподготовки

1. Опишите общую имитационную модель формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом.
2. Опишите метод построения математической модели червячной зуборезной фрезы.
3. Опишите алгоритма прямой трассировки зубьев фрезы.
4. Каковы общие принципы оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.
5. Как осуществляется моделирование припуска при формообразовании поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес?
6. Опишите информационную модель технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.

7. Опишите модель технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес.
8. Опишите методику выбора и назначения технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес.
9. Опишите факторы, влияющие на назначение параметров поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес.
10. Что входит в комплексные параметры состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес?
11. Что входит в комплексные параметры долговечности закаленных крупномодульных зубчатых колес?
12. Что входит в комплексный параметр по обеспечению минимальных пластических деформаций зубьев закаленных крупномодульных зубчатых колес?
13. Чем определяется качество поверхностного слоя зубьев при чистовой зубообработке крупномодульных закаленных колес?
14. Опишите процесс многокритериальной оптимизации эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе применения комплексных параметров их состояния.
15. Опишите схемы резания при интенсивной и высококачественной зубообработке и используемое при этом технологическое оснащение.
16. В чем заключаются технологические особенности зубообработки закаленных колес при одношпиндельной и двухшпиндельной схемах резания?
17. Опишите конструкцию технологического оснащения интенсивной и высококачественной зубообработки закаленных колес скоростными дисковыми немодульными фрезами, оснащенными керамикой.

6.6. Библиография

1. Адам Я.И. Производство зубчатых передач / Я.И. Адам, А.К. Сидоренко, Г. Г. Овумян // – К. : Южмашгиз, 1961. – 152 с.

2. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев [и др.] // – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // – М.: Наука, 1976. – 280 с.
4. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров // – М. : Машиностроение, 2001. – 368 с.
5. Бетанели А. И. Прочность и надежность режущего инструмента / А. И. Бетанели // – Тбилиси : Сабчота сакартвелло, 1973. – 304 с.
6. Билик Ш. М. Макрогеометрия деталей машин / Ш. М. Билик // – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.
7. Биргер И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич // – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
8. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов : учебник /В. Ф. Бобров // – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
9. Боудев Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боудев, Д. Табор; пер. с англ.// – М. : Машиностроение, 1968. – 543 с.
10. Вейц В. Л. Геометрия зацепления зубчатых передач / В. Л. Вейц, А. М. Волженская, Н. И. Колчин // – 3-е изд., перераб. и доп.. –Л. ; Машиностроение, 1978. – 136 с.
- 11.
12. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски – Взамен ГОСТ 1643–73; введ. 01.01.82. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 30 с.
13. ГОСТ 20736-75. Статистический приемочный контроль по количественному признаку. Планы контроля – Введ. 01.01.76. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 120 с.
14. Грицай І. Є. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання / І. Є. Грицай, В. І. Вільшанецький

- // – Вісник НТУ «ХПІ»: зб. Наук. праць. Т.Вигот.: – 2011. – С.44-52 .
15. Грицай І. Е. Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами / І. Е. Грицай // – Машинознавство. – 1998. – №7. – С. 19–23.
 16. Грицай І. Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2013. Вип. 32. – С.226–229.
 17. Грицай І. Е. Параметри поперченого перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьовою подачею / І. Е. Грицай, С. І Громнюк, А. М. Кук // – Вісник Національного університету «Львівська політехніка». : зб. наук. пр. : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 8–14.
 18. Гришко В. А. Повышение износостойкости зубчатых передач / В. А. Гришко // – М. : Машиностроение, 1977. –232 с.
 19. Гулида Э. Н. Измерение сил резания и крутящих моментов при зубофрезеровании / Э. Н. Гулида // – Львов : ЛГУ, 1966. – 134 с.
 20. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский // – М., 1975. – 222 с.
 21. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин // – М., 1970. – 227 с.
 22. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов // – М., 1981. – 244 с.
 23. Тимофеев Ю. В. Дослідження динаміки зубофрезерування крупно модульних загартованих коліс / Ю. В. Тимофеев, О. М. Шелковой, О. О. Ключко // – Вісник Інженерної академії України. – 2011. – № 3. – С. 99–103.
 24. Дружинский И. А. Сложные поверхности: математическое описание и

- технологическое обеспечение / И. А. Дружинский // – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 263 с.
25. Дунин-Барковский И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова // – М., 1978. – 230 с.
26. Елизоветин М. А. Технологические способы повышения долговечности машин. / М. А. Елизоветин, Э. А. Сатель // – М., 1969. – 400 с.
27. Зубчатые передачи: справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Ф. Голованов, Н. Б. Фирун, Н. Т. Халевский ; под ред. Е. Г. Гинзбурга // – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 416 с.
28. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова // М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
29. Иноземцев Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г. Г. Иноземцев // – М. : Машиностроение, 1984. – 272 с.
30. Ионак В. Ф. Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак // – М. : Машиностроение, 1981. – 128 с.
31. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане // – М. : Машиностроение, 2010. – 416 с.
32. Клочко А. А. Технологические особенности кинематики зубообработки крупномодульных закаленных колес дисковыми немодульными фрезами / А. А. Клочко // – Вібрації в техніці та технологіях : Всеукр. наук.-техн. журн. – 2011. – № 2(62). – С. 78–83. 88
33. Клочко А. А. Физическая картина эффективности прогрессивных схем зубофрезерования / А. А. Клочко // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения : информ. Сборник // – М. :ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 8. – С. 12–13.
34. Клочко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко // – Вестник Черниг. гос. технолог. ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68.

35. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек / А. А. Ключко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Ключко, Е. В. Мироненко // – Високі технології в машинобудуванні :зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). –С. 138–145.
36. Теоретические предпосылки повышения эффективности процесса формообразования изделий зубообрабатывающим инструментом / А. А. Ключко, Ю. А. Ключко, В. Г. Белых, В. И. Печеный // – Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем :сб. науч. тр. ДГМА. – Краматорск, 1999. – С. 150–154.
37. Технологическое прогнозирование точности изготовления зубчатых реек / А. А. Ключко, Е. В. Мироненко, В. А. Овчаренко, В. Г. Белых, Ю. А. Ключко; пред. редсовета Г. Л. Хаеа // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем :сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2000. – Вып. 10. – С. 143–148.
38. Ключко А. А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А.А. Ключко, А. Н. Кравцов // – Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" – Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.
39. Коганов И. А. Прогрессивные методы изготовления цилиндрических зубчатых колес / И. А. Коганов, Ю. Н. Федоров, Е. Н. Валиков // – М. : Машиностроение, 1981. – 136 с..
40. Кораблев А. И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов // – М. : Машиностроение, 1968. – 288 с.
41. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов // – М. : Машиностроение, 1977. – 525 с.
42. Крагельский И. В. Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин // – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

43. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов / В. С. Кушнер // – Иркутск : Иркутский ун-т, 1982. – 180 с.
44. Лашнев С. И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами / С. И. Лашнев // – М. : Машиностроение, 1971. – 216 с.
45. Левина З. М. Контактная жесткость машин / З. М. Левина , Д. Н. Решетов // – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.
46. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости / А. И. Лурье // – М. : Машиностроение, 1955. – 491 с.
47. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров // – М. : 1976. – 278 с.
48. Маталин, А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин // – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1966. – 252 с.
49. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин // – К., 1971. – 140 с.
50. Маталин А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин // – Л., 1977. – 460 с.
51. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин // – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 496 с.
52. Вибір і призначення систем параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е. В. Мироненко, О. М. Шелковий, О. О. Ключко, О. М. Кравцов // – Вісник Національного університету «Львівська політехніка». : зб. наук. пр. : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 207 – 213.
53. Мироненко Е. В. Взаимосвязь мощности и крутящего момента при формообразовании зубьев колес и реек / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем :

- сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2007. – Вып. 22. – С. 30 – 34.
54. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Д. Ковалев [и др.] // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – Вып. 25. – С. 90–94.
55. Мироненко Е. В. Менеджмент инструментального обеспечения машиностроительного предприятия / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2007. – Вып. 22. – С. 96 – 100.
56. Мироненко Е. В. Технология предварительной обработки закаленных зубчатых колес и реек дисковыми сборными фрезами с отдельной схемой резания / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. С. Лебединский // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – Вып. 28. – С. 219 – 225.
57. Митрофанов Е. П. Автоматизация технологической подготовки производства / Е. П. Митрофанов, Ю. А. Гульков, Д. Д. Куликов // – М., 1974. – 360 с.
58. Митрофанов Е. П. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства / Е. П. Митрофанов // – М. : Машиностроение, 1981. – 285 с.
59. Крупномодульные закаленные колеса. Новые технологические направления зубообработки. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.] // – Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2009. – № 4. – С. 18–19.
60. Михайлов А. Н. Синтез технологического обеспечения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А. М. Лахин, В. А. Соосар // – Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 28 – 36.
61. Онищенко В. П. Математическая модель процесса износа рабочих по-

- верхностей зубьев зубчатых колес / В. П. Онищенко // – XIII Międzynarodowe Kolokwium "Modelewo projekto waniuk onstruowaniamaszyn" 25 – 28.04.1989 г., Zakopane. Zeszyty naukowc Politechniki Slaskiej. Mechanika, Z.92, Gliwice. – 1989. – S. 215 – 223. PL
62. Онищенко В. П. Прогнозирование формы профилей зубьев зубчатых передач в результате их износа / В. П. Онищенко // – Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: Донецкий – Государственный Технический Университет – 1998. – вып.5. – С.155 – 163.
63. Опитц Г. Современная техника производства (состояние и тенденции) / Г. Опитц; под ред. В. С. Васильева // – М. : Машиностроение, 1975. – 280 с.
64. Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего шетрумента / В. А. Остафьев // – М. : Машиностроение, 1979. – 168 с.
65. Павлице В. Т. Основы конструювання та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлице // – К. : Виша школа, 1993. – 556 с.
66. Пат. 2064376 Российская Федерация, МКИ В23 F 5/08, 5/12. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Ключко, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Г. Н. Руин., Н. А. Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 4915857 ; заявл. 23.01.91 ; опубл. 27.07.96, Бюл. № 21. – 5 с. : ил. 152
67. Пат. 2082567 Российская Федерация, МКИ В23 F 5/00. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Ключко, Г. Н. Руин, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Н. А. Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 92009350 ; заявл. 01.12.92 ; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18. – 6 с. : ил. 153
68. Пронников А. С. Надежность машин / А. С. Пронников // – М. : Машиностроение, 1978. – 590 с.
69. Прочность и надежность механического привода / под ред. В. Н. Кудрявцева, Ю. А. Державна // – М. ; Л. : Машиностроение, 1977. –

- 558 с.
70. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н.С. Равская, О.А. Охріменко, П.П. Мельничук, О.В. , Т.П. Ніколаєнко // – Навчальний посібник з грифом МОН України (лист №1/11-5203 від 12.03.2013), К.: Вид. СКД-Друк 2013. – 126 с.
 71. Расчеты и проектирование деталей машин /Жуков К. П. [и др.]; под. ред. Г. Б. Столбина, К. П. Жукова // – М. : Высшая школа, 1978. – 247 с.
 72. РДМУ109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. Методические указания // – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 64 с.
 73. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников // – М. : Машиностроение, 1981. – 278 с.
 74. Решетов Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д. Н. Решетов // – М. : Машиностроение, 1974. – 232 с.
 75. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин // – К.: Вища школа, 1976. – 191 с.
 76. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. Л. Розенберг // – К. : Наукова думка, 1990. – 320 с.
 77. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов // – К. : Техніка, 1984. – 272 с.
 78. Сидоренко А. К. Особенности изготовления крупномодульных колес / А. К. Сидоренко // – М. : Машиностроение, 1976. – 112 с.
 79. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин // – М. : Машиностроение, 1979. – 153 с.
 80. Скоростное зубофрезерование / О. И. Мойсеенко, И. П. Захаренко, Л. С. Сидоренко, С. И. Диденко, Л. Е. Мастный // – К. : Техника, 1972. – 216 с.
 81. Соломенцев Ю. М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, С. П. Протопопов // – М. : Маши-

- ностроение, 1980. – 536 с.
82. Специальные технологии зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Ключко [и др.] // – Краматорск : ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9. 193
83. Информационное моделирование технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 351–358..
84. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане // – С-Пб. : Профессия. 2007. – 832 с.
85. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов // – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
86. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений [Текст] // А.Г. Суслов [и др.] ; под общ. ред. А.Г. Суслова // – М.: Издательство: Машиностроение, 2006. – 447 с.
87. Сухоруков Ю. Н. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката / Ю. Н. Сухоруков, Р. И. Евстигнеев // – К. : Техника, 1983. – 120 с.
88. Технологические аспекты обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – Вып. 26. – С. 183–190.
89. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національно-

- го технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.
90. Технология обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес твердосплавными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 40. – С. 109–123.
91. Тимофеев Ю. В. Технологические особенности зубофрезерования крупномодульных коррегированных закаленных колес / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // – Вісник СевНТУ – Севастополь, 2012. – Вип. 129. – С. 238–245.
92. Импульсная электроконтактная технология зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов накатными роликами / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный // – Вісник Національного технічного університету «ДПІ». – Донецьк : НТУ «ДПІ», 2012. – № 9(205). – С. 194–201.
93. Тимофеев Ю. В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упроченного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко // – Вісник Національного технічного університету «КПІ». – Київ: НТУ «КПІ», 2012. – № 64. – С. 288–293. 212
94. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н. В. Кравцов, Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко [и др.]; науч. ред. А. А. Пермяков // – ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.
95. Обеспечение технологической точности обработки крупномодульных зубчатых колес специальным профилированием фрез / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // – Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 24. – С. 77–83.
96. Технологические основы обеспечения производительности, точности и

- качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, Е. В. Мироненко // – Вісник Донецького Національного технічного університету. – Донецьк : ДНТУ, 2013. – № 1 (10)'(2013). – С. 131–140.
97. Тимофеев Ю. В. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // – Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64)'(2013).– С. 49–55.
98. Тимофеев Ю. В. Технология зубофрезерования закаленных крупномодульных колес специальными червячными фрезами с минимизирующими параметрами главных режущих кромок / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов // – Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк, 2010. – Вип. 29. – С. 209–216.
99. Тимофеев Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов // – Вісник СевНТУ – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144.
100. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина : в 2 кн. // – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. I. – 400 с.
101. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина : в 2 кн. // – М. : Машиностроение, 1979. – Кн. II. – 358 с.
102. Шелковой А. Н. Исследование динамики зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес с помощью WAVLET-анализа [Текст] / А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // – Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. - с. 106 – 115.
103. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупно-

- модульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 274–280.
104. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко // – Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – № 83. – С. 286–295.
105. Шелковой А. Н. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // – Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 8. – С. 185–200.
106. Шелковой А. Н. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский // – Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.
107. Ямников А. С. Ресурсосберегающие технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес [Текст] / А.С. Ямников, А.А. Маликов, Е.Н. Валиков, А.В. Сидоркин // – Технология машиностроения.– 2008. – №7. – С. 7 – 10.
108. Ямпольский Л.С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – К.:Тэхніка, 1988. – 175 с.
109. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В.И. Аверченков // – Минск, 1977. – 254 с.

7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

7.1. Актуальность применения современных средств измерения

Надежность правильно сконструированной машины, функционирование ее узлов, а значит, и ресурс в определяющей степени зависят от геометрической точности изготовления деталей по сопрягаемым поверхностям. Повышение требований к качеству машин влечет за собой ужесточение допусков. Каждое десятилетие допуски ужесточаются примерно в 1,5 раза. Одновременно повышается и доля трудоемкости операций контроля в технологическом процессе изготовления деталей и изделий, совершенствуются измерительные средства. В машиностроении контроль занимает около 15 % общей трудоемкости продукции, а в капитальных вложениях доля измерительных средств и контрольного оборудования достигает 20 % объема средств, расходовемых на технологическое оборудование.

Для полного контроля деталей промышленность получила широкоуниверсальное, автоматическое, достаточно гибкое средство контроля – координатные измерительные машины (КИМ), укомплектованные мини – контроллерами или ЭВМ для управления работой КИМ и обработки результатов измерения. КИМ пригодны для контроля деталей с формообразующими поверхностями любой сложности. Благодаря их применению, повышается точность и достоверность результатов измерения. Использование принципов оперативного и диалогового программирования дало возможность упростить применение КИМ как универсального средства контроля в единичном и мелкосерийном производствах. Пример КИМ показан на рис. 7.1.

Преимущественно в КИМ используется координатный метод измерения, сводящийся к последовательному нахождению координат ряда точек изделия и последующему расчету размеров. Его главное достоинство – универсальность, возможность автоматизации процесса измерения. Именно это привело к его широкому использованию не только в КИМ, но и в разметочных маши-

нах и в станках с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащенных измерительными контактными головками, координатными шкалами и ЭВМ в системе управления. Метод сканирования поверхности бесконтактными измерительными головками применяется для оцифровки сложных поверхностей с затрудненным доступом посредством щупа и является основой процесса «Reverse Engineering».

КИМ значительно упрощает метрологическую подготовку производства нового изделия, так как отпадает необходимость создания значительного количества средств специальной измерительной оснастки. Протокол с результатами контроля, выдаваемый КИМ, повышает ответственность изготовителей за качество обработки и во многих случаях является



Рис. 7.1. КИМ с ЧПУ DEA Turphon

свидетельством соответствия технологического процесса требованиям, которые устанавливаются заказчиком выпускаемой продукции.

Новые задачи по обеспечению качества изготовления деталей и выработки рекомендаций для сборки возникают с применением КИМ в ГПС. КИМ в составе ГПС должна иметь возможность автоматически принять деталь, опознать ее, выбрать программу измерения и измерительный инструмент, произвести измерения, передать и обработать результаты измерения на ЭВМ для принятия решения о пригодности детали и технологического процесса или о необходимости ввести корректировку в программу ЭВМ и соответствующее программное обеспечение должны обеспечивать хранение протоколов об отклонениях размеров проверенных деталей, статистически их обрабатывать, преобразовывать результаты обмеров в необходимые для

САПР САД – форматы.

В мировой практике уже имеется ряд примеров применения универсальных КИМ в измерительных модулях, работающих по безлюдной технологии и встраиваемых в ГПС, и специальных КИМ для ГПС – так называемых измерительных роботов.

7.2. Устройство и принцип действия КИМ

Работа КИМ основана на координатных измерениях, т.е. на поочередном измерении координат определенного числа точек поверхности детали и последующих расчетах линейных и угловых размеров, отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат.

Используются три основные системы координат:

- абсолютная система координат машины (СКМ);
- относительная система координат машины (СКО);
- система координат детали (СКД).

СКМ образуют направляющие координатных перемещений и измерительные системы КИМ, начало СКМ выбирается произвольно. Направление осей СКО совпадает с направлением осей СКМ, а начало совмещается с центром или другой точкой калибратора (геометрического элемента, неподвижного во время измерения). СКО обеспечивает единство координатных данных при измерении несколькими измерительными инструментами КИМ, взаимодействующими с измеряемой поверхностью, в случае изменения их параметров или положения в СКМ. Результаты измерения представляются в СКД, которая формируется путем измерения положения в СКМ выбранных базовых поверхностей детали. СКД может изменяться в процессе измерения. Все операции по расчету систем координат и трансформации значений координатных данных выполняются по программе автоматически, на основе данных измерений, вводимых в системы координат машины.

Координатные измерения реализуются комплексом аппаратных и программных средств. КИМ можно условно разделить на базовую часть, содер-

жащую узлы координатных перемещений, измерительные преобразователи (ИП) и измерительную головку (ИГ), предназначенную для непосредственного измерения координат точек, и управляющий вычислительный комплекс (УВК) на основе ЭВМ, предназначенный для управления процессом измерения, обработки и представления данных измерений. Габариты, конструкция, точность базовой части в основном определяются параметрами измеряемых деталей и условиями эксплуатации. Для определения структуры УВК решающими являются тип ИП и ИГ базовой части КИМ, требуемая степень автоматизации измерений, показатели программно – математического обеспечения и требования к форме представления результатов измерений. Состав и показатели программно-математического обеспечения зависят от спектра метрологических задач и степени автоматизации КИМ.

Структурная схема КИМ представлена на рис. 7.2. Координаты точек детали измеряются в СКМ (X_m , Y_m , Z_m), реализуемой прецизионными линейными перемещениями ИГ 1 относительно измеряемой детали. Деталь или ИГ перемещаются с помощью узлов 2 координатных перемещений базовой части КИМ. Перемещения отсчитываются посредством ИП 3 в направлении всех координатных осей СКМ. Перемещения ИГ или детали механизированных и автоматических КИМ производятся электромеханическими приводами 4 или вручную. Для обеспечения доступа к измеряемым поверхностям определенного класса деталей и упрощения расчетных операций при измерении в полярной, цилиндрической и сферической системах координат базовая часть КИМ может снабжаться поворотными столами 5, предоставляющими возможность поворачивать детали относительно одной или нескольких осей, расположенных под различными углами в пространстве.

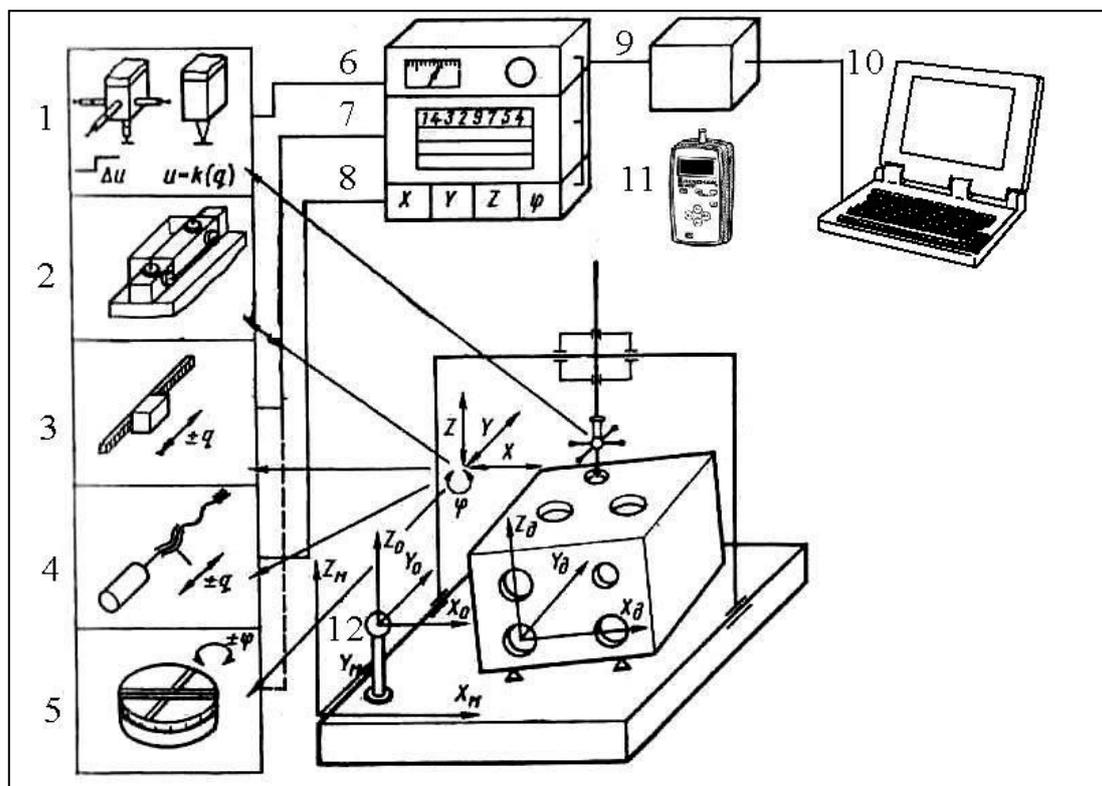


Рис. 7.2. Структурная схема КИМ

Координаты точек могут считываться при движении узлов КИМ или в состоянии их покоя. Первый режим реализуется с применением нулевых измерительных головок (головок касания) или головок отклонения. В головках касания в момент соприкосновения измерительного наконечника с измеряемой поверхностью происходит дискретное изменение электрического сигнала, являющееся командным сигналом на останов и реверс приводов. Головки данного типа не дают информации о значении и направлении смещения их измерительных наконечников. При взаимодействии же наконечника ИГ с измеряемой поверхностью представляется информация о значении, а иногда и направлении смещения измерительного наконечника из исходного положения. Отсчет координат точек проводится после достижения нулевых показаний встроенных в ИГ измерительных преобразователей или по команде от системы управления. Во втором случае координаты точек определяются суммированием показаний измерительных преобразователей ИГ и КИМ. Измерения в динамическом режиме обладают высоким быстродействием и уни-

версальностью, однако несколько меньшей точностью (главным образом, из-за колебаний подвижных узлов КИМ).

Точность измерения повышается при измерении в статическом режиме, когда отсчет координат точек производится в состоянии покоя подвижных узлов КИМ. Этот способ измерения реализуется только с применением ИГО.

Измерения в динамическом режиме реализуются при ручном и автоматическом управлении, а в статическом – только при автоматическом управлении, за исключением КИМ с жесткими измерительными наконечниками, устанавливаемыми вместо ИГ. Такие наконечники использовались в малогабаритных ручных КИМ невысокой точности и в настоящее время используются в основном в конструкции выотомеров.

Обработку электрических сигналов ИГ и ИП, управление электроприводами, обработку и представление данных измерений осуществляет УВК. В состав УВК входят нормирующие преобразователи 6, 7 ИП, ИГ и ИП базовой части КИМ, блок управления электроприводами 8, которые через блок связи 9 или непосредственно соединены с ЭВМ 10. К нормирующим преобразователям 7 подсоединены счетчики с устройствами цифровой индикации (УЦИ), индицирующие текущие значения положения ИГ относительно детали. Управление подвижными узлами КИМ в автоматическом режиме осуществляется от ЭВМ, а в ручном – от специального пульта 11. ЭВМ, кроме управления измерительными органами КИМ, выполняет обработку данных измерения. Эта обработка включает следующие операции:

- 1) Определение координат и поправок отдельных измерительных наконечников измерительных головок. Необходимую информацию для этих расчетов получают измерением калибровочного элемента 12 – аттестованной с высокой точностью образцовой детали (сферы или куба), сохраняющей в процессе измерения неизменное положение относительно СКМ. Выполнение данной операции необходимо после каждого изменения параметров или положения ИГ относительно узла КИМ, на котором она закреплена. Результаты вводятся в память ЭВМ и учитываются при расчетах геометрических пара-

метров детали.

2) Формирование систем координат детали, которые необходимы для правильной оценки результатов измерения, возможности переустанавливать деталь в процессе измерения, не теряя при этом единства измерений. СКД может быть сформирована относительно любых геометрических элементов детали, однозначно определяющих положение и ориентацию СКД в СКМ. Число СКД не ограничивается.

3) Выполнение расчетов геометрических параметров деталей. При этом учитываются координаты и параметры отдельных измерительных наконечников ИГ, производится трансформация результатов, связанная с образованием нескольких систем координат.

4) Выполнение статистической обработки результатов измерений.

5) Подготовка данных для автоматического управления с учетом уже выполненных операций и полученных результатов измерений.

6) Представление результатов измерения в необходимом объеме и в виде удобном для пользования.

Порядок измерения на КИМ зависит от устройства УВК, базовой части, средств и методов подготовки программ и в общем случае включает следующие операции:

1) По чертежу или образцу детали определяются параметры, подлежащие контролю.

2) Определяется последовательность измерений и расчетов, системы координат детали, необходимое число, форма и ориентация измерительных наконечников, способ установки и крепления детали, форма представления результатов измерений. Состав измеряемых поверхностей и рассчитываемых размеров, параметров отклонений формы и взаимного расположения зависит от возможностей программно-математического обеспечения и мощности средств вычислительной техники. Все современные КИМ предоставляют возможность измерять детали с типовыми поверхностями – поверхностями – плоскостями, цилиндрами, конусами, сферами или их сегментами. Число из-

меряемых точек может колебаться в довольно широких пределах – от минимального, однозначно определяющего рассматриваемую линию или поверхность, до нескольких сотен. От числа точек измерения зависит точность расчетов характеристик поверхности и производительность измерения. В общем случае измеряют до 20 точек на каждой поверхности. С уменьшением числа точек измерения повышается вероятность возникновения значительных погрешностей измерения вследствие влияния отклонений формы, повреждений и местных загрязнений измеряемых поверхностей. Увеличение числа точек снижает производительность контроля. Наиболее совершенные КИМ могут измерять детали со сложными криволинейными поверхностями – зубчатые колеса, лопатки турбин, распределительные валы и т. п., а также произвольные криволинейные поверхности, не описываемые аналитически. Для измерения деталей сложной формы с большим числом поверхностей различных форм и расположения КИМ снабжаются ИГ, в которые одновременно может быть установлено до 25 – 40 измерительных наконечников. Необходимая универсальность может достигаться поворотом ИГ или сменой измерительного датчика и применяемого щупа в процессе измерения, осуществляемыми вручную или по программе с помощью ЭВМ. Установка и крепление детали предусматриваются такими, чтобы она в процессе измерения не сдвигалась и не деформировалась; кроме того, должен быть обеспечен доступ к измеряемым поверхностям.

3) В соответствии с разработанным планом проведения измерения составляется программа измерения, включающая подготовку системы управления КИМ, калибровку измерительных наконечников ИГ, определение СКД, измерение координат точек, ввод номинальных значений и предельных отклонений измеряемых параметров, расчет их фактических значений, распечатку протоколов и представление данных в графическом виде, с возможностью последующей обработки посредством специального программного обеспечения. Информация об измеряемой поверхности может быть собрана путем дискретных измерений каждой точки отдельно или непрерывным сле-

жением по поверхности. В первом случае при измерении в каждой точке измерительный наконечник вводится в соприкосновение с измеряемой деталью и выводится из него после снятия показаний измерительных систем. Такой способ является основным при измерении линейных и угловых размеров, отклонений взаимного расположения; он особенно удобен при измерении деталей с указанными типовыми поверхностями. Для его реализации используются оба типа ИГ. При измерении слежением (сканированием) измерительный наконечник вводится в контакт с измеряемой поверхностью и без отрыва перемещается по контуру в определенных сечениях. Во время движения считываются значения координат необходимого для расчетов числа точек. Для считывания информации может быть принято постоянное или расстояние по координате протяжки, или расстояние между двумя следующими рядом точками, или расстояние по контуру, или угол в полярной системе отсчета, или высота хорды между соседними точками отсчета и т. д. Данный способ измерения является основным для определения размеров и отклонений формы криволинейных поверхностей. Реализуется он только с применением измерительных головок отклонения.

4) Измерение первой детали включает установку детали на предметном столе КИМ; ввод программы измерения; ручную калибровку измерительных наконечников; ручное измерение координат точек на базовых поверхностях детали для формирования СКД; ручное или автоматическое измерение детали и расчет измеряемых параметров. Результаты расчетов в процессе измерения накапливаются в памяти ЭВМ. Эти данные в дальнейшем используются для расчета производных геометрических элементов.

При измерении последующих деталей калибровка ИГ и определение положения детали могут быть исключены или все операции могут быть выполнены автоматически.

7.3. Методы координатных измерений

Все методы координатных измерений, независимо от того, где они реа-

лизуются (на КИМ, измерительных роботах или металлорежущих станках), основаны на методе сравнения с мерой, в качестве которой выступают шкалы измерительных преобразователей (*encoders*) – сверхточных датчиков измерения линейных перемещений. КИМ в соответствии с этим методом можно рассматривать как прибор сравнения двух величин, одна из которых является измеряемой координатой (координатой наконечника щупа измерительной головки, находящегося в контакте с деталью, т.е. координатой точки поверхности детали), а другая – координатой корпуса ИГ в системе координат КИМ (координатой шкалы датчика перемещения). Таким образом, КИМ как прибор сравнения имеет два входа – сигнал ИГ и показание датчика перемещений.

Сравнение указанных величин в соответствии с ГОСТ 16263 – 70 может проводиться тремя разновидностями метода сравнения с мерой:

- нулевым методом;
- дифференциальным методом;
- методом противопоставления.

На рис. 7.3 показаны схемы взаимодействия датчиков перемещений КИМ, ИГ и измеряемой детали при реализации различных методов координатных измерений как в ручных, так и в автоматических КИМ. Рассматриваемые методы иллюстрируются измерением одной координаты x , и условно считается, что одна из точек (базовая) совпадает с началом шкалы датчика координатных перемещений.

Нулевой метод рассмотрим на примере измерения с помощью ручной КИМ. Измерение линейного размера вдоль координаты осуществляется следующим образом (рис. 7.3, *a*). Перемещают жесткий измерительный наконечник 2 до соприкосновения с поверхностью измеряемой детали 1. Наконечник 2 установлен через переходник 3 на каретке 4, которая перемещается вдоль шкалы 5 датчика, расположенного на основании КИМ.

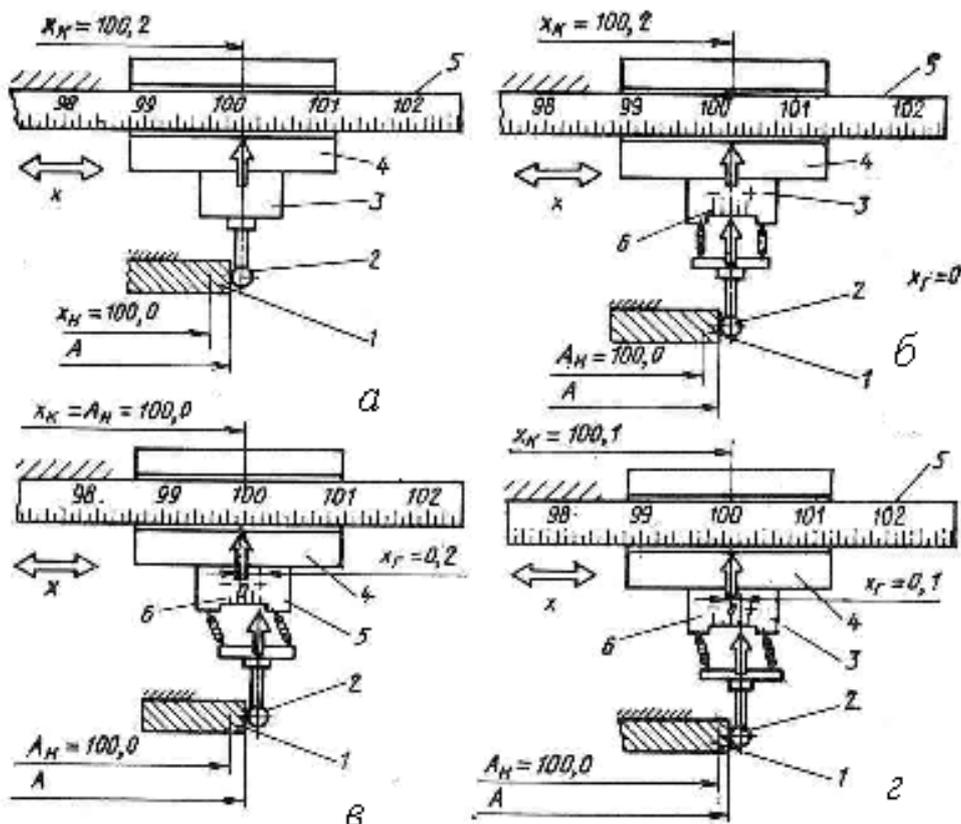


Рис. 7.3. Методы координатных измерений

Отсчет значения измеряемой величины A осуществляется по шкале 5 датчика перемещений КИМ:

$$A = x_k = 100,2 \text{ мм.}$$

Отклонение величины A от номинала определяется как

$$\delta = A - A_N = 100,2 - 100,0 = 0,2 \text{ мм.}$$

Описанный нулевой метод измерения на ручной КИМ, являющийся разновидностью метода сравнения с мерой, определяется по ГОСТ 16263 – 70 как метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия на прибор сравнения измеряемой величины, воспроизводимой мерой, доводят до нуля.

В рассматриваемом случае до нуля доводится зазор между измеряемой поверхностью и жестким наконечником, а в качестве меры выступает шкала координатного датчика КИМ.

Применение жесткого измерительного наконечника ограничивает точ-

ностные возможности координатных измерений, возникают большие усилия измерений. Отсутствие возможного перебега щупа, в отличие от головок отклонения, не позволяет автоматизировать процесс измерения.

Для решения задачи автоматизации измерений используют ИГ (нулевые отклонения).

В головках отклонения выходной сигнал пропорционален смещению наконечника относительно корпуса. Схемы их возможных взаимодействий с измеряемой поверхностью и датчиками КИМ значительно разнообразнее. Поэтому при использовании в КИМ головок отклонения могут быть реализованы несколько разновидностей метода сравнения с мерой (нулевой метод, дифференциальный метод, метод противопоставления).

На рис. 7.3, б показана схема взаимодействия ИГ отклонения с измеряемой поверхностью и датчиком перемещения КИМ при нулевом методе сравнения с мерой. Здесь: 1 – измеряемая деталь, 2 – измерительный наконечник, 3 – корпус головки отклонения, 4 – каретка, несущая головку, 5 – шкала датчика одной координаты (x) КИМ, 6 – шкала датчика ИГ. В соответствии с нулевым методом корпус 3 головки перемещается до тех пор, пока показания ИГ не станут равными нулю ($x_2=0$), т. е. доводится до нуля результирующий эффект воздействия многозначной меры и измеряемой величины на прибор сравнения. В этом положении снимается показание шкалы датчика перемещений КИМ и производится обработка результатов измерения:

$$A = x_k = 100,2 \text{ мм}; \delta = A - A_n = 100,2 - 100,0 = 0,2 \text{ мм.}$$

При такой реализации нулевого метода сравнения с мерой достигается высокая точность измерений. Метод нашел применение в прецизионных КИМ, однако при этом необходимо дополнительное время на «успокоение» приводов.

Дифференциальный метод – это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной, воспроизводимой мерой.

При дифференциальном методе сравнения с мерой корпус ИГ, расположенный на каретке 4 (рис. 7.2, в), устанавливается по датчику КИМ на заданный номинальный размер A_n (100,0 мм), а по шкале 6 датчика ИГ определяется (считывается) отклонение от измеряемого размера A от A_n :

$$\delta = A - A_n = 0,2 \text{ мм.}$$

Этот метод при измерении сложных пространственных поверхностей (сложных контуров) иногда называют методом эталонной (образцовой) траектории.

Метод противопоставления – это метод сравнения с мерой при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

Применительно к координатным измерениям метод противопоставления представлен на рис. 7.2, г. Измеряемая величина (измеряемая поверхность детали 1, размер $A = 100,2$ мм) воздействует на наконечник 2, а величина, воспроизводимая мерой, соответствует положению корпуса 3 головки. Измерительная головка устанавливает соотношение между величинами A и x_k :

$$A = x_k + x_2 = 100,1 + 0,1 = 100,2 \text{ мм;}$$

$$\delta = A - A_n = 0,2 \text{ мм.}$$

При работе КИМ по методу противопоставления съем показаний x_2 может осуществляться в любом положении наконечника 2 относительно корпуса при соблюдении условия одновременного съема показаний x_2 и x_k .

7.4. Классификация измерительных преобразователей

Несмотря на то, что все ИП выполняют одну и ту же задачу – преобразование физических величин с заданной точностью, в частных, конкретных случаях функции их весьма разнообразны. Ограничимся систематизацией ИП по некоторым обобщенным признакам.

По функциональному назначению ИП делят на следующие: масштабные, преобразователи одной физической величины в другую, функциональные преобразователи с одной входной величиной, функциональные преобразователи с несколькими входными величинами, интегрирующие, дифференцирующие, фильтры.

Масштабные преобразователи не изменяют род физической величины, но изменяют её масштаб, значение. К ним относятся делители напряжения и тока, трансформаторы напряжения и тока, усилители с однородными входными и выходными величинами, аттенюаторы, и другие.

Широко представлены в измерительной технике преобразователи одной физической величины в другую. Это и простейшие ИП, как шунты, преобразующие ток в напряжение, добавочные резисторы, преобразующие напряжение в ток, термопары, преобразующие температуру в ЭДС, так и весьма сложные, как лазерные преобразователи температуры в напряжение, и многие другие.

Функциональные преобразователи с одной входной величиной решают задачу нелинейного преобразования одной величины. К ним относятся преобразователи, возводящие в степень, извлекающие корни, логарифмические, тригонометрические и другие, связанные с реализацией нелинейных функций одного аргумента.

Функциональные преобразователи с несколькими входными величинами реализуют функциональную зависимость между этими величинами и выходной величиной преобразователя. К ним относятся устройства умножения, например, датчики Холла, электродинамические измерительные механизмы ваттметров, устройства для деления, например, логометрические преобразователи различных типов.

Интегрирующие и дифференцирующие преобразователи реализуют функции интегрирования и дифференцирования. Примером их могут служить интегрирующие и дифференцирующие RC и LR цепочки, известные из электротехники, интегратор и дифференциаторы на операционных усилите-

лях, счётчики импульсов.

Как измерительные преобразователи очень широко применяются различные фильтры, позволяющие улучшить качественный состав преобразуемой величины, соотношение между полезным сигналом и помехами.

По виду воздействий (входных величин) ИП делят на механические, акустические, световые, тепловые, электрические, магнитные, электромагнитные, радиационные.

Полезно деление ИП на две группы: энергетические и параметрические. Первые характеризуются тем, что для осуществления преобразования требуется только воздействие преобразуемой активной величины. Параметрические же преобразователи должны быть возбуждены от постороннего источника энергии – активизированы.

По виду представления измерительной информации ИП делят на аналоговые, когда входная и выходная величины непрерывны, модуляционные, характеризующиеся тем, что параметры гармонического колебания или последовательности импульсов под воздействием входной величины изменяются в соответствии с изменением этой величины, цифровые, преобразующие квантованную дискретную величину в другую квантованную дискретную величину, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Измерительные приборы дополнительно можно классифицировать по виду сравниваемых обобщенных сил и обобщенных скоростей: устройства со сравнением (уравновешиванием) механических сил и моментов, со сравнением электрических напряжений, со сравнением электрических токов, со сравнением магнитных потоков.

7.5. Задачи моделирования точности в машиностроительном производстве

Комплексная задача управления точностью и качеством деталей при механической обработке в настоящее время особенно актуальна. Активное воздействие на технологический процесс, реализуемое с помощью систем авто-

матического управления, позволяет повысить точность размеров и формы обрабатываемых изделий, снизить шероховатость и волнистость обработанных поверхностей, улучшить технико-экономические показатели обработки и повысить надежность функционирования технологических систем.

Моделирование процедур формирования параметров качества при механической обработке деталей является основой прогнозирования их точности и оптимизации технологии. Достоверный прогноз качества значительно сокращает сроки подготовки производства новых изделий, снижает затраты на поиск путей достижения заданной точности изготовления деталей и изделий в целом. Разработка и функционирование гибких производственных систем (ГПС) позволяют повысить производительность труда в механических цехах. В то же время процедуры разработки технологии механической обработки, их апробация и доводка, несмотря на существующие САПР, все еще осуществляются с большой долей ручного труда. Большинство САПР не оснащены подпрограммами, прогнозирующими параметры качества. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения физического моделирования, т. е. экспериментальной апробации разработанного технологического процесса с последующей его коррекцией, что увеличивает сроки подготовки производства новых изделий.

Освоение ГПС предполагает исключение из производственного оборота таких технологических документов, как маршрутные и операционные карты, и передачу выбранных режимов резания и управляющих программ непосредственно на УЧПУ станками. В этой связи возрастает значение прогноза параметров качества. Назначаемые для ГПС режимы резания и характеристики инструмента должны предварительно проверяться на математических моделях процессов и систем для гарантированного обеспечения заданных параметров качества.

В настоящее время технология механической обработки деталей наряду с ординарными приемами включает приемы и способы достижения заданного уровня качества, основанные на управлении упругодеформированным со-

стоянием заготовок в процессе их обработки, что особенно эффективно при обработке нежестких деталей. Управление упругим деформированием заготовок и оптимизация параметров этого процесса позволяют достичь заданого уровня качества при сохранении высокой производительности [1, 2, 3].

Развитие микропроцессорной вычислительной техники и ее широкое использование для обработки данных привели к необходимости организации вычислительных процессов, ориентированных на применение микро ЭВМ. Использование математических моделей технологических систем формообразования деталей, управляемых микропроцессорной вычислительной техникой, позволяет повысить надежность управляющих программ.

Прогнозирование параметров качества при механической обработке деталей на базе анализа имитационных моделей их формирования позволяет создать алгоритмы оценки технологии, использовать эти алгоритмы для выбора оптимальных технологических условий на стадии проектирования технологии и тем самым уменьшить до минимума необходимость в физическом моделировании при разработке технологических процессов изготовления деталей. Задача эта сложная, поскольку число факторов, обуславливающих качество обрабатываемых поверхностей, достаточно велико. Большинство факторов имеет нестабильный характер (неравномерность твердости заготовок, колебания припуска, вибрации при резании, электрические процессы в стыке резец-заготовка и т. п.), при обработке они, как правило, не контролируются и не управляются. В настоящее время задача прогнозирования параметров качества решается статистическим методом, путем накопления данных о точности типовых операций [4, 5, 6]. Рекомендации, полученные таким методом, имеют большое количество ограничений.

Наиболее часто используемый параметр качества детали – точность линейных размеров ее поверхностей и их взаимного пространственного положения. Этот параметр достаточно полно стандартизован и хорошо обеспечен метрологически.

Среди характеристик качества деталей важное место занимают параметры, описывающие свойства их поверхностей. Опыт отечественной и зарубежной промышленности показывает, что 80 % случаев выхода из строя машин при их эксплуатации происходит из-за износа в сопряжениях узлов трения. Износ деталей машин характеризуется разрушением контактного поверхностного слоя, в котором в результате взаимодействия сопрягающихся поверхностей происходят физико-химические усталостные изменения. При назначении параметров качества это обстоятельство обуславливает особое внимание к характеристикам поверхности деталей.

Для полного учета характеристик сопрягающихся поверхностей, влияющих на их износ, в технике используется большое количество параметров. Часть из них стандартизована, часть находится в стадии апробации и определяется лабораторными методами. Ниже приведены основные характеристики поверхности деталей.

Геометрические характеристики охватывают две подгруппы параметров — шероховатость и волнистость поверхности.

Шероховатость – совокупность неровностей с относительно малыми шагами по базовой длине. Шероховатость поверхности характеризуется стандартными параметрами, регламентированными ГОСТ 2789 – 73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики», а также рядом нестандартных параметров, которые широко используются как в исследовательских работах, так и в практике. Стандартные параметры: среднее арифметическое отклонение профиля – R_a ; высота неровностей профиля по десяти точкам – R_z ; наибольшая высота неровностей – R_{max} ; средний шаг неровностей – S_m ; шаг неровностей по вершинам – S ; относительная длина профиля – tr . Эти параметры имеют хорошее метрологическое обеспечение в нашей стране и за рубежом. Нестандартные параметры: расстояние от линии выступов до средней линии – R_p ; средний радиус микронеровностей – ρ ; угол наклона микронеровностей относительно средней линии – α ; число выступов

на базовой длине – M и другие. Эти параметры определяются по профилограммам шероховатой поверхности.

Волнистость – неровности поверхности, имеющие шаг, значительно превышающий шаг шероховатости. Шаг волнистости включает несколько базовых длин, используемых для измерения шероховатости. Стандартные параметры волнистости, оговоренные в рекомендации СЭВ по стандартизации РС 3951 – 73 «Волнистость поверхности. Термины, определения, параметры»: максимальная высота волнистости – W_{max} ; средняя высота волнистости по десяти точкам – Wz ; средний шаг волнистости – SmW , радиус закругления вершины волны – $R\omega$ и другие (параметры отклонения от круглости H_{max} и H_p , аналогичные параметрам шероховатости R_{max} и R_p).

В табл. 7.1 показана взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей с параметрами качества их поверхности [4].

Таблица 7.1 – Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей с параметрами качества их поверхности

Эксплуатационное свойство	Шероховатость						Волнистость			Макроотклонение	
	Ra	Rz	R_{max}	Sm	S	tp	Wa	W_{max}	SmW	H_{max}	H_p
Сухое трение	(+)	(+)	(+)	(+)	—	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+
Жидкое трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	+	+	(+)	+
Усталостная прочность	(+)	(+)	+	(+)	—	—	—	+	(+)	(+)	(+)
Контактная жесткость	(+)	(+)	(+)	(+)	—	4-	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Виброустойчивость	(+)	(+)	(+)	+	—	+	(+)	-	(+)	(+)	+
Коррозионная стойкость	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	-	(+)
Прочность сопряжений	(+)	(+)	—	(+)	—	+	(+)	—	(+)	(+)	+
Плотность соединения	+	(+)	(+)	(+)	—	+	+	(+)	(+)	(+)	+
Прочность покрытий	(+)	+	(+)	+	—	(+)	(+)	(+)	(+)	—	—
Обтекаемость газами и жидкостями	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+

Примечание. + — параметр оказывает основное влияние на эксплуатационное свойство; (+) — параметр оказывает ограниченное влияние на эксплуатационное свойство; — — влияние отсутствует.

Механические характеристики поверхностного слоя регламентируются рядом стандартов, например ГОСТ 20495 – 75 «Упрочнение металлических деталей поверхностной химико-термической обработкой. Характеристики и свойства диффузионного слоя. Термины и определения». В числе таких характеристик – поверхностные твердость и хрупкость слоя,

деформационное упрочнение, остаточные напряжения (их величина и знак). Эти характеристики оценивают такими параметрами, как микротвердость поверхности, степень наклепа, степень деформации зерен, статическое искажение кристаллической решетки, измеряемыми металлографическими и рентгеноструктурными методами.

К физико-химическим характеристикам относятся особенности кристаллической решетки по зонам и фазам материала, химический состав поверхностного слоя, экзоэлектронная эмиссия, оптические свойства поверхности. Эти характеристики исследуются сугубо лабораторным путем. При этом измеряются плотность дислокаций, концентрация вакансий, концентрация элементов в фазе, работа выхода электронов и др.

Перечисленные выше параметры и характеристики поверхностного слоя деталей позволяют в полной мере задать свойства сопряжений, при которых может быть обеспечена их максимальная долговечность, а следовательно, и качество изделия в целом. Учитывая сложность измерения отдельных параметров, не все их вводят в техническую документацию на изделия и их детали. На современном этапе развития техники наиболее широко используются геометрические характеристики поверхности деталей.

Учитывая вероятностный характер параметров качества при механической обработке деталей, сравнительный анализ результатов, полученных при различных технологических способах обработки и управления, проводится с помощью аппарата математической статистики. В большинстве статистических методик используется нулевая гипотеза, предполагающая факт нормального распределения параметров качества. При математическом моделировании априорно неизвестен закон распределения параметров качества, и проверить нулевую гипотезу практически невозможно, к тому же физическое моделирование снижает эффективность математического

моделирования. Поэтому при статистической оценке используются приемы непараметрической статистики, особенность которой – принятие статистических решений без аппроксимации к известным законам распределения.

К числу первоочередных статистических задач относится обоснование объема исследовательской выборки, при этом непараметрический подход позволяет получить универсальное решение.

Для любых двух порядковых статистик вероятность, сосредоточенная в интервале между ними, является случайной величиной и имеет бета-распределение, независимо от исходной функции распределения. Если β – вероятность того, что доля генеральной совокупности, находящаяся между максимальным $Y_{(n)}$ и минимальным $Y_{(1)}$ наблюдениями не меньше $\gamma - 100\%$, то

$$P\left[\left|F\left(Y_{(n)}\right)-F\left(Y_{(1)}\right)\right|\geq\gamma\right]=\beta, \quad (7.1)$$

где выражение в квадратных скобках имеет бета-распределение. Используя его стандартное обозначение, можно выражение (7.1) записать в виде

$$1-J_{\gamma}(n-1,2)=\beta. \quad (7.2)$$

Решение этого уравнения относительно объема выборки n позволяет оценить информацию γ с доверительной вероятностью β . Для решения бета-функция заменяется ее асимптотическим выражением

$$J_{\gamma}(m,n-m+1)=\sum_{k=m}^n\binom{k}{n}\gamma^k(1-\beta)^{n-k}. \quad (7.3)$$

где m – номер порядковой статистики упорядоченного ряда, от которого ведется отсчет (в рассматриваемом случае $m = 1$).

Тогда выражение (7.2) может быть представлено в виде

$$\beta = 1 - n \cdot \gamma^{n-1} - (n-1) \cdot \gamma^n. \quad (7.4)$$

Выражение (7.4) может быть упрощено с погрешностью не более 2 % путем разложения его в ряд Тейлора и удержания первых трех членов.

Таким образом, зависимость (7.5) позволяет получить такой объем выборки n , при реализации которого с вероятностью β не менее, чем $\gamma \times 100\%$, доля генеральной совокупности находится между максимальным и минимальным наблюдениями. Традиционно для технологических задач, связанных с обработкой резанием, принимаются доверительные вероятности $\beta = 0,90 - 0,95$. Очевидно, что такой же порядок должны иметь значения объема достоверной информации γ .

$$n = 0,5 - \sqrt{2\beta} (\ln(\gamma))^{-1}. \quad (7.5)$$

Решение уравнения (7.5) позволяет рекомендовать объемы исследовательских выборок, представленные в табл. 7.2.

Таблица 7.2 – Рекомендуемые объемы исследовательских выборок

Значение γ	Объем выборки n при значениях β	
	0,90	0,95
0,90	13	14
0,95	27	28

При исследованиях, результаты которых приведены ниже, объем выборок варьировался в пределах $n=10-20$. В стремлении максимально использовать основные положения непараметрической статистики законы распределения результатов моделирования не отыскивались, распределения оценивались гистограммами результатов моделирования.

При моделировании принципиальной является оценка статистической значимости результатов, полученных при использовании различных технологических способов и средств обработки для управления точностью и качеством. Оценка точности и надежности результатов моделирования необходима вследствие ограниченности объемов этих результатов.

Представление о точности и надежности оценок дано с использованием доверительных пределов $\varepsilon_\beta(y)$ и доверительных интервалов $J_\beta(y)$ при выбранной доверительной вероятности $\beta=0,9$. Непараметрическая статистика допускает применение нулевой гипотезы о нормальном распределении средних значений упорядоченного статистического ряда. При оценке математического ожидания и его приближенного значения – среднего значения ряда – справедливо для расчетов вариации среднего использовать критерий Стьюдента t .

Тогда

$$\varepsilon_\beta(y) = t_\beta \sqrt{\frac{D(y)}{n}}, \quad (7.6)$$

$$J_\beta(y) = 2\varepsilon_\beta(y), \quad (7.7)$$

где t_β – критерий Стьюдента при выбранной доверительной вероятности β и объеме выборки n ; $D(y)$ – выборочная дисперсия.

Таким образом, если при одном из технологических воздействий средняя величина упругого перемещения заготовки равна \bar{y}_1 , а при другом воздействии в том же сечении она составляет \bar{y}_2 , то эти воздействия следует считать неконкурентоспособными при условии

$$P[\bar{y}_1 - \varepsilon_\beta(y_1)] \leq \bar{y}_2 \leq \bar{y}_1 + \varepsilon_\beta(y_1). \quad (7.8)$$

Таблица 7.3 – Значения t с погрешностью не более 2 %

Значение n	Критерий Стьюдента t_β при значениях β	
	0,90	0,95
10—15	1,80	2,20
16—30	1,72	2,09

Если же при втором технологическом воздействии среднее перемещение не попадает в доверительный интервал для среднего перемещения при первом технологическом воздействии, то эти воздействия на технологическую

систему можно считать конкурентоспособными. В табл. 7.3 приведены

значения t , которые с погрешностью не более 2 % использованы в прикладных программах.

При расчете выборочной дисперсии в целях минимизации расчетного алгоритма и уменьшения числа операторов в прикладной программе использовано видоизмененное выражение

$$D(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n}}{n-1}. \quad (7.9)$$

Ниже наряду со статистическими методами прогнозирования качества изложен детерминированный подход к проблеме образования неровностей при механической обработке. Расчеты и примеры приведены для случаев обработки деталей типа тел вращения.

7.5.1. Моделирование механизма образования погрешности

Создание математических моделей, методов анализа и синтеза решений, связанных с оценкой точности на стадии проектирования, позволяет сопоставить возможные варианты исследуемого объекта с целью выбора наиболее подходящего варианта решения. При этом возникает общая задача разработки комплексной точностной модели, охватывающая широкий спектр вопросов. Анализ работ в этой области показал, что для комплексной точностной модели недостаточно подробно изучено влияние на точность таких факторов, как отклонения формы поверхности от идеальной, собственные и контактные деформации, температурные факторы и износ [1].

Моделирование механизма образования погрешностей. Процесс формообразования складывается из организованных программных движений, обеспечивающих этот процесс, и неорганизованных, формирующих реальную поверхность изделия [2]. Программные перемещения изучены достаточно

подробно. Неорганизованные перемещения возникают под действием погрешностей кинематических и размерных цепей и погрешностей, возникающих в результате упругих перемещений в системе СПИД. Для определения погрешностей рассмотрим обработку резцом 1 детали 2 (рис. 7.7). Деталь 2, установленная на реальную поверхность детали 3, под действием силы F с помощью манипулятора перемещается из положения I в положение II. В результате погрешностей кинематических и размерных цепей манипулятора точка M_0 идеальной поверхности займет положение $M_{д1}$, определяемое вектором $\{\delta_1\}_д$ (рис. 7.7).

Предположим, что между стыкуемыми поверхностями S_1 и S_2 образовался некоторый зазор $\{\Delta_{i=1}\}$. Профили поверхностей определяются систематической и случайной составляющими. При базировании одной детали на поверхности другой детали произойдет дополнительное изменение положения первой детали вследствие ее микроперемещений под действием веса P и под влиянием случайных факторов, характеризующих рельеф стыкуемых поверхностей S_1 и S_2 . В результате этого точка $M_{д1}$ переместится на величину $\{\delta_2\}_д$ и займет положение $M_{д2}$. При этом тела 1 и 2 будут соприкасаться через опорные или физические точки контакта.

При базировании в месте стыка поверхностей S_1 и S_2 в области $\{D_1\}$ возникнут силы $\{N_1\}$, а также образуются зазоры $\{\Delta_{i=2}\}$, размеры которых имеют случайный характер.

На следующем этапе установки происходит закрепление установленных деталей силами $\{Q\}$. В результате собственных и контактных деформаций, возникающих под действием сил закрепления $\{Q\}$ и веса P , в станке возникнут контактные силы $\{N_2\}$, распределенные на некоторые области $\{D_2\}$. Точка $M_{д2}$ переместится в положение $M_{д3}$ (вектор $\{\delta_3\}_д$). Зазор $\{\Delta_{i=2}\}$ в месте стыка поверхностей ($S_1 - S_2$) между двумя сопрягаемыми точками тип изменится на величину $\{\Delta_{i=3}\}$.

Предположим, что при механической обработке точку M_u вершины резца 1 следует поместить в положение M_0 . В результате можно выделить по-

$$\{\delta_{SM}\} = \{\delta\}_u + \{\delta_2\}_\delta. \quad (7.12)$$

Формулы (7.10) – (7.12) после преобразований с учетом износа инструмента и явлений релаксации в детали можно представить в следующем виде:

$$\{\delta_{SM}\} = \{\delta_{S_1}\} + \{\delta_{S_2}\}, \quad (7.13)$$

где $\{\delta_{S_1}\}$ – погрешность кинематических и размерных цепей

$$\{\delta_{S_1}\} = \{\delta_1\}_u = \{\delta_1\}_\delta + \{\delta_2\}_u - \{\delta_2\}_\delta + \{\delta_{из}\}_u, \quad (7.14)$$

где $\{\delta_{из}\}_u$ – погрешность, возникающая вследствие износа инструмента;

$\{\delta_{S_2}\}$ – погрешность обработки, вызванная собственными контактными деформациями и явлениями теплопереноса

$$\{\delta_{S_2}\} = \{\delta_3\}_u - \{\delta_3\}_\delta + \{\delta_4\}_u - \{\delta_u\}_\delta - \{\delta_p\}_\delta, \quad (7.15)$$

где $\{\delta_p\}_\delta$ – погрешность, возникающая вследствие явлений релаксации в детали.

В работе [1] показано, что для расчета точности при автоматизированном проектировании механизм образования погрешностей может быть описан для всех этапов функционирования станка на основе дискретной модели. В основу дискретной модели точности положена схема сопряжения поверхностных и объемных конечных элементов, аппроксимирующих систему СПИД станка.

Дискретная модель точности. Основными положениями для построения дискретной модели точности на основе поверхностных и объемных конечных элементов являются следующие.

Геометрические образы детали, инструментов и технологического оборудования (ТО) станка представляются множеством $\{\Phi\}$ фиксированных узлов (рис. 7.5).

На множестве узлов $\{\Phi\}$ выделяется подмножество $\{\Phi_s^*\}$ (точки под-

множества $\{\Phi_s^*\}$ на схеме, показанной на рис. 7.8, обозначены звездочкой), описывающее геометрический образ обрабатываемой поверхности. Эти подмножества являются геометрическим местом точек детали, образующейся в результате обработки инструментом.

Технологическое оборудование металлорежущего станка представляется в виде упорядоченного множества контактирующих тел. Эти тела имеют реальный геометрический образ, характеризуются отклонением формы поверхности, ее положением, состоянием микрорельефа, а также зазорами (натягами), поэтому для описания особенностей состояния поверхностей выделяется на множестве $\{\Phi\}$ подмножество $\{\Phi_s^*\}$ поверхностных узлов.

Узлы, образующие множества $\{\Phi\}$ и $\{\Phi_s^*\}$, соединяются воображаемыми линиями или поверхностями. В результате этого поверхности звеньев можно представить совокупностью поверхностных элементов (S), а их внутреннюю структуру – множеством (e) объемных конечных элементов.

Непрерывные величины (поверхности, поля перемещений, температур и т.д.) аппроксимируются на каждом элементе заранее заданной функцией.

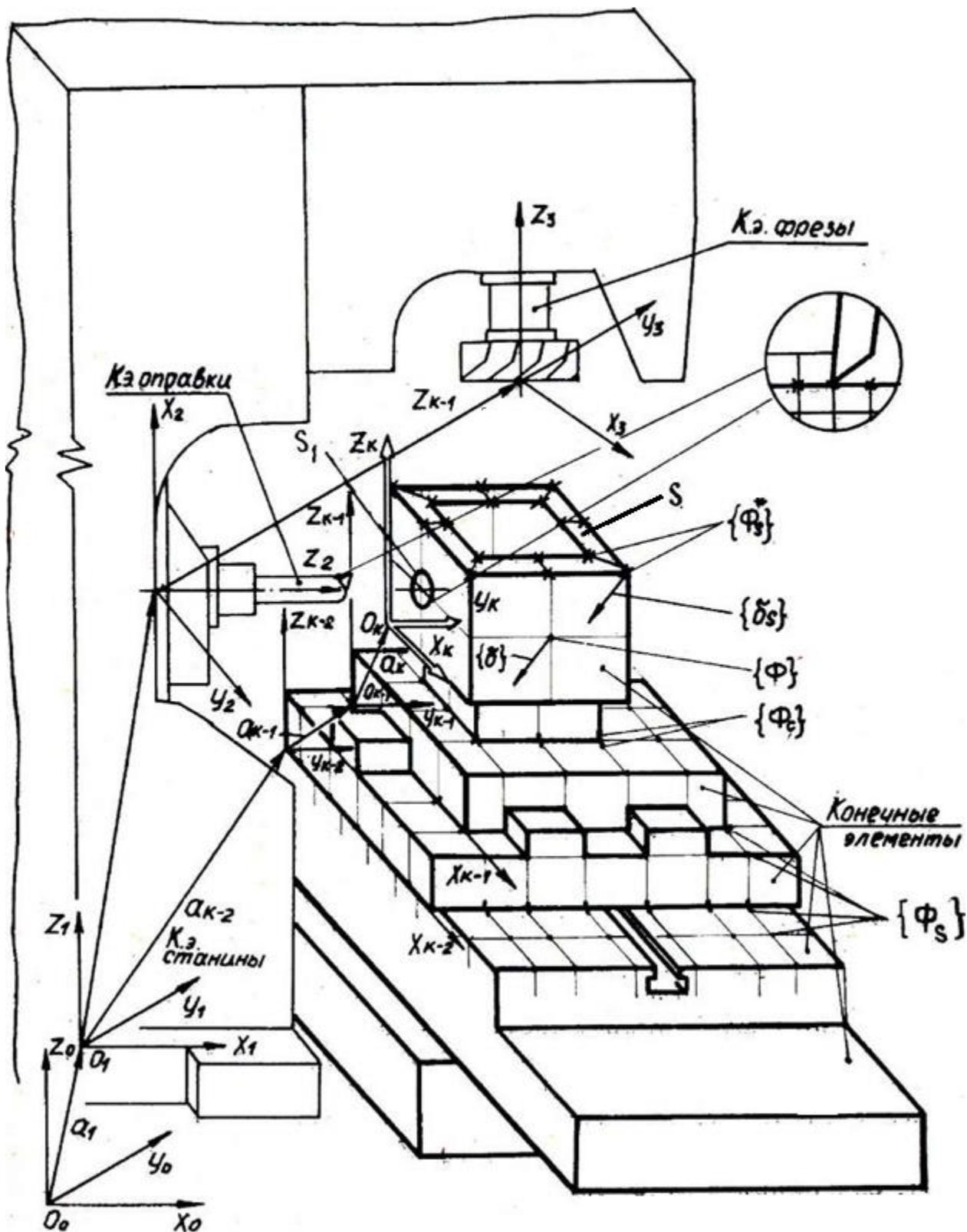


Рис. 7.5. Описание конструкции станка множествами поверхностных и объемных элементов

Подобласти или конечные элементы связаны между собой в определенных заранее заданных точках (узлах), поэтому предполагается, что взаимо-

действие между элементами производится через эти точки, причем характер взаимодействия определяется характером связей между узлами (жесткая, шарнирная, контактная и т. д.).

По методу координатных систем с деформируемыми связями [2] с каждым звеном станка связана подвижная ортогональная система координат X_k, Y_k, Z_k , заданная относительно системы координат $X_{k-1}, Y_{k-1}, Z_{k-1}$, определенных в некоторой глобальной системе X_0, Y_0, Z_0 . Производится фиксация положения узлов (r) в системах координат. Узлам (r) ставится в соответствие множество координат узлов, характеризующих идеальную форму требуемого прототипа. Узлам (rs) поверхностных элементов ставится в соответствие множество $\{X_r\}$ координат, описывающее отклонения формы или положений узлов поверхностных элементов.

Элементам ставятся в соответствие их физико-механические характеристики, которые могут иметь детерминированную и стохастическую природу.

Перемещения и повороты звеньев станка по координатным осям рассматриваются как перемещения и повороты множеств поверхностных (S) и объемных (e) элементов, связанных с этими системами. Для формирования геометрического образа изделия подвижным системам координат X_k, Y_k, Z_k сообщаются через некоторые интервалы времени $\Delta\tau$ соответствующие движения и производятся их фиксация и фиксация связанных с ними узлов относительно глобальной системы координат X_0, Y_0, Z_0 .

Для положений звеньев, соответствующих заданному моменту времени τ , определяются система сил и температурные факторы, которые воздействуют на ТО станка, распределение зазоров в стыках и величины перемещений отдельных узлов.

Для фиксации в заданном относительном положении звеньев вводится множество $\{\Phi_c\}$ стержневых элементов, параметры жесткости которых имеют стохастические или детерминированные характеристики, соответствующие жесткостным характеристикам стыкуемых поверхностей.

Расположение этих элементов определяется конструктивной схемой станка.

Выбирается метод или принцип, на основе которого строится схема сопряжения элементов. Конечные элементы в совокупности аппроксимируют исследуемую конструкцию станка, поэтому после нахождения узловых значений перемещений $\{\delta\}$ узлов (r) считается, что определены также отклонения $\{\delta_s\}$ подмножества $\{\Phi_s^*\}$.

Аппроксимация величин отклонений, определяемых векторами $\{\delta_s\}$ по методу наименьших квадратов, позволяет получить аналитическое выражение поверхности $\{S\}$ и стохастические параметры, характеризующие ее отклонение. Обработка полученных результатов по принятым методическим рекомендациям [3] позволяет получить характеристики точностной надежности станков.

Конечноэлементное представление деталей и узлов позволяет на основании метода координатных систем с деформируемыми связями описать относительное положение поверхностей технологического оборудования станка при движении звеньев [2]. При этом движение одного звена относительно другого представляется как движение множества конечных элементов, аппроксимирующих это звено, относительно множества конечных элементов, аппроксимирующих другое.

Расчленим изображенную на рис. 7.5 конструкцию на объемные конечные элементы, пронумерованные от 1 до N_e . Конечные элементы соединяются между собой в узлах (r), которые пронумерованы от 1 до n_r . Для описания относительного положения звеньев вводятся некоторая глобальная ортогональная система координат X_0, Y_0, Z_0 и система координат X_k, Y_k, Z_k (где k – индекс звена или узла), связанная с деталью или звеньями технологического оборудования станка.

Если представить положение некоторого узла r в системах координат звеньев k и $k-1$ векторами $\{\rho_k\}_r$ и $\{\rho_{k-1}\}_r$, то соотношение между ними можно записать следующим образом:

$$\{\rho_k\}_r = [M]_{k,k-1} \{\rho_{k-1}\}_r, \quad (7.16)$$

где $[M]_{k,k-1}$ – матрица, выражающая отношения между системами координат с учетом деформирующих связей;

$\{\rho_k\}_r$, $\{\rho_{k-1}\}_r$ – вектор-столбцы, определяющие положение узла r в системах координат звеньев k и $k-1$ соответственно;

$$\{\rho_{k-1}\}_r = [x_r y_r z_r]_{k-1}^T; \{\rho_k\}_r = [x_r y_r z_r]_k^T, \quad (7.17)$$

здесь x_r , y_r , z_r – проекции вектора $\{\rho\}_r$ на координатные оси в старой и новой системах координат.

Матрицу преобразований координат $[M]_{k,k-1}$ удобнее представить в виде матрицы четвертого порядка [4], для чего следует ввести однородные координаты. В этом случае формула (7.28) преобразований координат будет иметь следующий вид:

$$\begin{Bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ l \end{Bmatrix}_k = [M]_{k,k-1} \begin{Bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ l \end{Bmatrix}_{k-1}. \quad (7.18)$$

Матрицу $[M]$ можно записать через элементы a_{ml} ($m=1, 2, 3, 4$; $l=1, 2, 3, 4$):

$$[M]_{k,k-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\omega]_{k,k-1} & -[\omega_a]_{k,k-1} \\ 0 \ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.19)$$

В матрице $[\omega]$ элемент a_{ml} ($m=1, 2, 3$; $l=1, 2, 3$) – косинус угла между новой осью с номером m и старой с номером l . Элементы a_{14} , a_{24} , a_{34} , образующие матрицу $\{\omega_a\}$ – проекции в новой системе координат X_k , Y_k , Z_k начала O_{k-1} старой системы координат X_{k-1} , Y_{k-1} , Z_{k-1} .

Зависимость между проекциями одного и того же вектора в различных системах координат можно записать следующим образом:

$$\{\bar{m}_k\} = [\omega]_{k,k-1} \{\bar{m}_{k-1}\}. \quad (7.20)$$

Между матрицами прямого $[\omega]_{k,k-1}$ и обратного $[\omega]_{k-1,k}$ преобразования проекций векторов следующее соотношение:

$$[\omega]_k = [\omega]_{k-1}^T. \quad (7.21)$$

Переход вектора $\{\rho\}$ системы координат звена $k-1$ в систему координат звена k определяется равенством

$$\{\rho_{k-1}\} = [M']_{k-1,k} \{\rho_k\}, \quad (7.22)$$

где $[M']_{k-1,k}$ – обратная матрица;

$$[M']_{k-1,k} = \begin{bmatrix} [\omega]_{k,k-1}^T & \begin{bmatrix} -\alpha_k \\ -\beta_k \\ -\gamma_k \\ 1 \end{bmatrix} \\ 0 & \end{bmatrix}. \quad (7.23)$$

где $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ – проекции начала координат O_k в системе координат $X_{k-1}, Y_{k-1}, Z_{k-1}$.

При исследовании точности положение обрабатываемой поверхности детали ЗАВИСИТ от положений других звеньев, поэтому необходимо многократное преобразование координат через промежуточные координатные системы, осуществляемое с помощью матриц $[M]$:

$$(\rho_0)_r = \prod_{k=1}^{n_k} [M']_{k-1,k} (\rho_k)_r. \quad (7.24)$$

Применение матриц четвертого порядка дает следующие преимущества: в каждой матрице одновременно учитываются поворот и смещение соответствующей системы координат; при использовании

формулы (7.36) над матрицами производятся действия одного вида – умножение.

При расчетах станков повороты и перемещения координатных систем задаются с помощью матриц последовательных вращений и матриц поступательных перемещений начала систем координат. Матрицы последовательных вращений можно записать (здесь и далее индекс k опущен):

относительно оси X :

$$[\omega_x(\varphi_x)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_x & \sin \varphi_x \\ 0 & -\sin \varphi_x & \cos \varphi_x \end{bmatrix}; \quad (7.25)$$

относительно оси Y :

$$[\omega_y(\varphi_y)] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y & 0 & -\sin \varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y \end{bmatrix}; \quad (7.26)$$

относительно оси Z :

$$[\omega_z(\varphi_z)] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_z & \sin \varphi_z & 0 \\ \sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7.27)$$

Матрица $\{a\}$ поступательных перемещений имеет вид:

$$\{a\} = [a_x \ a_y \ a_z]^T. \quad (7.28)$$

В формулах (7.25) – (7.28):

$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – углы последовательных поворотов вокруг координатных осей X, Y, Z ;

a_x, a_y, a_z – составляющие перемещений начала O_k координат новой системы X_k, Y_k, Z_k относительно старой системы $X_{k-1}, Y_{k-1}, Z_{k-1}$.

Согласно работе [2], ошибки положения звена станка могут быть представлены также в виде матриц последовательных вращений вокруг координатных осей $[\omega_x(\psi_x)]$, угловых погрешностей и в виде вектор-столбца $\{P_\delta\}$ линейных смещений:

$$[\omega_x(\psi_x)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi_x & \sin\psi_x \\ 0 & -\sin\psi_x & \cos\psi_x \end{bmatrix}; \quad (7.29)$$

$$[\omega_y(\psi_y)] = \begin{bmatrix} \cos\psi_y & 0 & -\sin\psi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi_y & 0 & \cos\psi_y \end{bmatrix}; \quad (7.30)$$

$$[\omega_z(\psi_z)] = \begin{bmatrix} \cos\psi_z & \sin\psi_z & 0 \\ \sin\psi_z & \cos\psi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7.31)$$

$$\{P_d\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T. \quad (7.32)$$

где $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – малые углы поворота;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – малые смещения начала системы координат.

Особенность матриц $[\omega_x(\varphi_x)]$, состоит в том, что при их последовательном умножении аргументы складываются. В этом случае матрица косинусов углов поворота с учетом малых возмущений ψ_x, ψ_y, ψ_z может быть записана в виде:

$$[\omega] = [\omega_z(\varphi_z + \psi_z)][\omega_y(\varphi_y + \psi_y)][\omega_x(\varphi_x + \psi_x)]. \quad (7.33)$$

Положение начала O_k новой системы координат звена k относительно старой системы координат звена $k-1$ можно определить помощью матрицы

$$\{a\} = [\alpha + \varepsilon_x \beta + \varepsilon_y \gamma + \varepsilon_z]^T. \quad (7.34)$$

После ввода обозначений $[\omega] = [\omega(\varphi + \psi)]$ можно определить элементы a_{14} , a_{24} , a_{34} , a_{44} матрицы $\{\omega_a\}$, образующей четвертый столбец матрицы $[M]$, из следующей формулы:

$$\{\omega_a\} = [\omega(\varphi + \psi)](\{a\} + \{P_b\}). \quad (7.35)$$

Подставив матричные соотношения (7.33) и (7.35) в формулу (7.19), можно получить матричное преобразование систем координат:

$$[M]_{k,k-1} = \left[\begin{array}{c|c} \left[\frac{\omega(\varphi + \psi)_{k,k-1}}{00 \quad 0} \right] & - \left[\frac{\omega(\varphi + \psi)_{k,k-1}(\{a\} + \{P_b\})_{k,k-1}}{1} \right] \\ \hline & \end{array} \right]. \quad (7.36)$$

Сформируем из угловых погрешностей ψ_x , ψ_y , ψ_z вектор-столбец $\{\psi\} = [\psi_x \ \psi_y \ \psi_z]^T$. Вектор-столбцы угловых погрешностей $\{\psi\}$ и малых смещений $\{P_\delta\}$ могут быть представлены в виде сумм:

$$\begin{aligned} \{\psi\} &= \{\psi_1\} + \{\psi_2\}; \\ \{P_\delta\} &= \{P_{\delta_1}\} + \{P_{\delta_2}\}, \end{aligned} \quad (7.37)$$

где $\{\psi_1\}$, $\{P_{\delta_1}\}$ – вектор-столбцы малых поворотов и малых смещений соответственно, образующиеся в результате проявления погрешностей кинематических и размерных цепей:

$$\begin{aligned} \{\psi_1\} &= [\psi_{1x} \ \psi_{1y} \ \psi_{1z}]^T; \\ \{P_{\delta_1}\} &= [\varepsilon_{1x} \ \varepsilon_{1y} \ \varepsilon_{1z}]^T; \end{aligned}$$

$\{\psi_2\}$, $\{P_{\delta_2}\}$ – вектор-столбцы малых поворотов и смещений соответственно, образующиеся в результате проявления возмущений от собственных и контактных деформаций и деформаций вследствие теплопереноса;

$$\begin{aligned} \{\psi_2\} &= [\psi_{2x} \ \psi_{2y} \ \psi_{2z}]^T; \\ \{P_{\delta_1}\} &= [\varepsilon_{2x} \ \varepsilon_{2y} \ \varepsilon_{2z}]^T; \end{aligned} \quad (7.38)$$

$\psi_{1x}, \varepsilon_{1x}, \psi_{2x}, \dots$ – составляющие вращения новых осей координат относительно старых осей координат и проекции на старые оси смещений начала O_k координат соответственно.

С учетом вектор-столбцов $\{\psi_1\}$, $\{\psi_2\}$, $\{P_{\delta_1}\}$, $\{P_{\delta_2}\}$ выражение (7.19) можно записать в общем виде:

$$[M] = \left[\begin{array}{c|c} \left[\frac{\omega(\varphi + \psi_1 + \psi_2)}{00 \ 0} \right] & -\left[\frac{\omega(\varphi + \psi_1 + \psi_2)}{1} \right] (\{a_1\} + \{P_{b_1}\} + \{P_{b_2}\}) \\ \hline & \end{array} \right]. \quad (7.39)$$

В глобальной системе координат X_0, Y_0, Z_0 положение точек (r) k – й детали определяется последовательным преобразованием координат через промежуточные координатные системы. Эти промежуточные системы для различных деталей образуют несколько координатных ветвей, соответствующих движению от систем координат X_0, Y_0, Z_0 к системе координат X_k, Y_k, Z_k . Например, положение точек координатной системы фрезы (рис. 7.5) определяется с помощью ветви, образующейся из последовательности $0; 1; 2; 3$. Для определения положения обрабатываемой детали используется ветвь, образующаяся из последовательности $0; 1; k-2; k-1; k$.

Для каждой координатной ветви ($i=1, 2, \dots, n_i$, где n_i – число членов ветви) вектор-столбцы $\{a_k\}$ и $\{\psi_k\}$ задаются так, чтобы они определяли положение i – й координатной системы относительно системы $i-1$. При таком задании вектор-столбцов в зависимости (7.36) должны быть матрицы прямого $[M]$ и обратного $[M']$ преобразований.

При обработке различных поверхностей различными инструментами из координатных ветвей образуются несколько координатных размерных цепей, поскольку в формообразовании участвуют различные узлы станка. Например, для обработки плоских поверхностей (см. рис.

7.5) образуется координатная цепь $3; 2; 1; 0; 1; k-2; k-1; k$. При составлении цепи координат принято направление: инструмент – глобальная система координат – обрабатываемая деталь. Соответственно координатным цепям матричные преобразования векторов $\{\rho\}$ также будут различными. Так, радиусы-векторы $\{\rho\}_\phi$ и $\{\rho\}_p$, определяющие положение формообразующей точки фрезы и резца, можно найти из выражений:

$$\begin{aligned} \{\rho\}_n &= [M]_{k,k-1} [M]_{k-1,k-2} [M]_{k-2,k-3} \dots [M]_{1,0} [M']_{0,1} [M']_{1,2} [M']_{2,3} \{\rho\}_\phi; \\ \{\rho\}_0 &= [M]_{k,k-1} [M]_{k-1,k-2} \dots [M]_{1,0} [M']_{0,1} [M']_{1,2} \{\rho\}_p. \end{aligned} \quad (7.40)$$

где $\{p\}_n$, $\{p\}_o$ – соответственно радиусы-векторы формообразующих точек в системах координат, связанных с обрабатываемой деталью, поверхностей S и S_I .

Заданное (идеальное) положение обрабатываемых поверхностей S и S_I можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \{\rho\}_{n.з} &= [M_1]_{k,k-1} [M_1]_{k-1,k-2} \dots [M_1]_{1,0} [M'_1]_{0,1} [M'_1]_{1,2} [M'_1]_{2,3} \{\rho\}_\phi; \\ \{\rho\}_{0.з} &= [M_1]_{k,k-1} [M_1]_{k-1,k-2} \dots [M_1]_{1,0} [M'_1]_{0,1} [M'_1]_{1,2} \{\rho\}_p. \end{aligned} \quad (7.41)$$

где $[M_1]$ и $[M'_1]$ – матрицы соответственно прямого и обратного преобразований, получаемые из матриц $[M]$ и $[M']$ при $\{\psi_1\} =$

$$\{\psi_2\} = \{P_{\delta_1}\} = \{P_{\delta_2}\};$$

$\{p\}_{n.з}$, $\{p\}_{o.з}$ – радиусы-векторы, характеризующие заданное положение точек поверхностей S и S_I .

Отклонения $\{\delta_s\}_n$, $\{\delta_s\}_o$ обрабатываемых поверхностей от заданных [2]:

$$\begin{aligned} \{\delta_s\}_n &= \{\rho\}_n - \{\rho\}_{n.з}; \\ \{\delta_s\}_o &= \{\rho\}_o - \{\rho\}_{o.з}. \end{aligned} \quad (7.42)$$

Соотношения (7.52) являются основными выражениями для определения погрешностей $\{b_s\}$ методом координатных систем с деформирующими связями. Составляющие вектор-столбцов $\{\psi_1\}$, $\{\psi_2\}$, $\{P_{\delta 1}\}$, $\{P_{\delta 2}\}$ определяются на основе схемы сопряжений.

Малые возмущения $\{\psi_1\}$ и $\{P_{\delta 1}\}$ определяются при рассмотрении движения одной детали по поверхности другой. В основу такого определения положено решение задачи о скольжении и микроперемещениях одного абсолютно твердого тела по реальной поверхности другого. В работе [1] подробно изложено решение этой задачи и определены элементы, матрицы $[M]$ с учетом отклонения формы и положения деталей. Погрешность $\{\delta_{s1}\}$, появившаяся в результате движения реальных звеньев как абсолютно твердых тел, можно определить на этапе базирования по найденным $\{\psi_1\}$ и $\{P_{\delta 1}\}$ из соотношений (7.40) – (7.42), если принять $\{\psi_2\} = \{P_{\delta 2}\} = 0$. Погрешность $\{\delta_{s2}\}$ также можно приближенно найти по формуле (7.40) и (7.43) при $\{\psi_1\} = \{P_{\delta 1}\} = 0$

Рассмотрим два метода определения погрешностей $\{\delta_{s2}\}$, возникающих под действием деформационных факторов: 1) непосредственно по заданным величинам $\{\psi_2\}$ и $\{P_{\delta 2}\}$; 2) выделением подмножества погрешностей $\{\delta_{s2}\}$ из множества $\{\delta\}$ отклонений всех узлов конструкции.

Эти погрешности можно найти после определения вектор-столбцов $\{\delta\}$ отклонений узлов обрабатываемой поверхности и инструмента на основе схемы взаимодействия конечных элементов.

В общем виде математическую модель, описывающую деформационное состояние станка методом конечных элементов (МКЭ), относительно некоторой глобальной прямоугольной системы координат можно представить матричным выражением [1]

$$\begin{bmatrix} [K] & [P_N] \\ [S] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta\} \\ \{N_f\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{\Delta\} \end{Bmatrix}. \quad (7.43)$$

где
$$\{Q\} = \{R\} - \{F\}_p - \{F\}_{\varepsilon_0}, \quad (7.44)$$

здесь $\{R\}$ – вектор-столбец внешних нагрузок;

$\{F\}_p$ – вектор-столбец сил, уравнивающих действие на элемент распределенных нагрузок;

$\{F\}_{\varepsilon_0}$ – вектор-столбец сил, вызванных начальной деформацией;

$[K]$ – матрица жесткости конструкции;

$[P_N]$ – матрица коэффициентов при нормальных и касательных нагрузках;

$[S]$ – матрица коэффициентов при перемещениях в уравнениях совместности деформаций в стыках деталей;

$\{\delta\}$ – вектор-столбец узловых перемещений;

$\{N_f\}$ – вектор-столбец неизвестных нормальных контактных нагрузок;

$\{\Delta\}$ – вектор-столбец зазоров в стыках.

Составляющие $\{\Delta\}$, $[P_N]$ и $[S]$ матричного выражения (7.44) описаны в работе [1], поэтому рассмотрим формирование матриц $[K]$ и $\{F\}_{\varepsilon_0}$. Предварительный анализ взаимодействия деталей на каждом этапе моделирования точности показывает, что элементы матриц $\{\Delta\}$, $[S]$, $[P_N]$ являются переменными величинами. Следовательно, погрешности, появившиеся при механической обработке, являются функцией не только факторов, воздействующих на сам процесс механической обработки, но и погрешностей, возникающих на предыдущих этапах.

7.5.2. Моделирование точности механической обработки резанием

Для управления качеством изделий на стадии проектирования технологических процессов механической обработки деталей выдвигаются требования моделирования процесса формирования параметров качества, в том числе шероховатости и волнистости. Наибольшую актуальность приобретает прогнозирование параметров качества на финишных операциях, поскольку в этом случае технологические дефекты в дальнейшем исправить нельзя. Обработка на токарных станках часто является финишной операцией, поскольку высокая точность современных токарно-винторезных и токарно-револьверных станков с ЧПУ, высокая стойкость режущего инструмента, выбор оптимальных режимов резания обеспечивают точение практически без наростообразования, прижогов и вибраций.

Управлять параметрами качества можно как на стадии проектирования технологии при технологической подготовке производства, так и при непосредственном управлении технологическими процессами и операциями. Анализ и оптимизация вариантов технологии на стадии ее проектирования предпочтительнее, поскольку при этом сокращаются сроки выбора оптимального варианта, снижаются затраты на подготовку производства новых изделий и упрощаются технические средства, непосредственно управляющие металлорежущим оборудованием. Для прогнозирования на стадии подготовки производства и автоматического управления параметрами качества в процессе обработки необходимо построение математической модели формирования параметров качества при обработке деталей.

На геометрическую точность и микрорельеф поверхности детали при механической обработке оказывает влияние большое число параметров и факторов: скорость резания V ; глубина резания t ; подача S ; геометрия и степень притупления инструмента; жесткость детали и технологической системы; состояние оборудования, в т. ч. степень его износа; точность приборов и методов измерения параметров точности, шероховатости и волнистости. Каждый из перечисленных параметров в процессе обработки может меняться, причем его величина колеблется около какого-то среднего значения, т. е.

имеет место сочетание систематических и случайных факторов. Эти факторы влияют на точность и образующийся при механической обработке микрорельеф поверхности в различной мере. Исследования показывают [4, 5], что уровень влияния отдельных факторов невелик и практически не контролируется современными измерительными приборами. Анализ значимости технологических и конструктивных факторов позволяет при построении формализованной модели процессов установить уровень их влияния на точность и микрорельеф и минимизировать модель. Априорно к числу факторов, оказывающих доминирующее влияние на формирование параметров качества деталей при механической обработке, отнесены режимы резания, жесткость детали, характеристика инструмента и степень его износа, физико-механические свойства обрабатываемого материала.

Оценка показателей качества обработанной поверхности. В результате моделирования на ЭВМ составляющих $\{\delta_{s1}\}$ и $\{\delta_{s2}\}$ погрешности процесса механической обработки и суммирования по (7.41) получается множество $\{\delta_s\}$ дискретных значений. Эти погрешности $\{\delta_s\}$ характеризуют геометрический образ реальной поверхности и ее отклонение от теоретической.

На рис. 7.6 показан фрагмент такой реализации составляющих погрешностей $\{\delta_{sz}\}$ вектора $\{\delta_s\} = [\delta_{sx} \ \delta_{sy} \ \delta_{sz}]^m$ для поверхности. Точность обработки на всей длине хода рабочего органа характеризуется двумя параметрами [3] (рис. 7.6) – максимальной погрешностью позиционирования δ_{Zmax} и величиной максимального разброса $+3\sigma_{max}$. Точность обработки в каждой точке на длине хода рабочего органа характеризуется текущей погрешностью δ_{sz} и текущей величиной разброса $\pm 3\sigma$.

Возникает задача получения стохастических оценок случайного процесса по множеству этих реализаций. В общем случае математическое ожидание и корреляционная функция определяются на основе теории стационарных случайных процессов. Алгоритм и

программа нахождения математического ожидания и корреляционной матрицы для одномерного случайного процесса приведены в работе [39].

Для поверхности сложной формы наиболее приемлемыми методами оценки качества являются методы теории планирования экспериментов [22, 23]. Аппроксимация поверхностей конечными элементами и аналитические выражения для откликов, описывающих поверхность внутри элемента, получаются на основе методов теории планирования экспериментов. Представление геометрического образа поверхности в виде функций откликов позволяет получить аналитические выражения для последующего имитационного моделирования поверхности на ЭВМ.

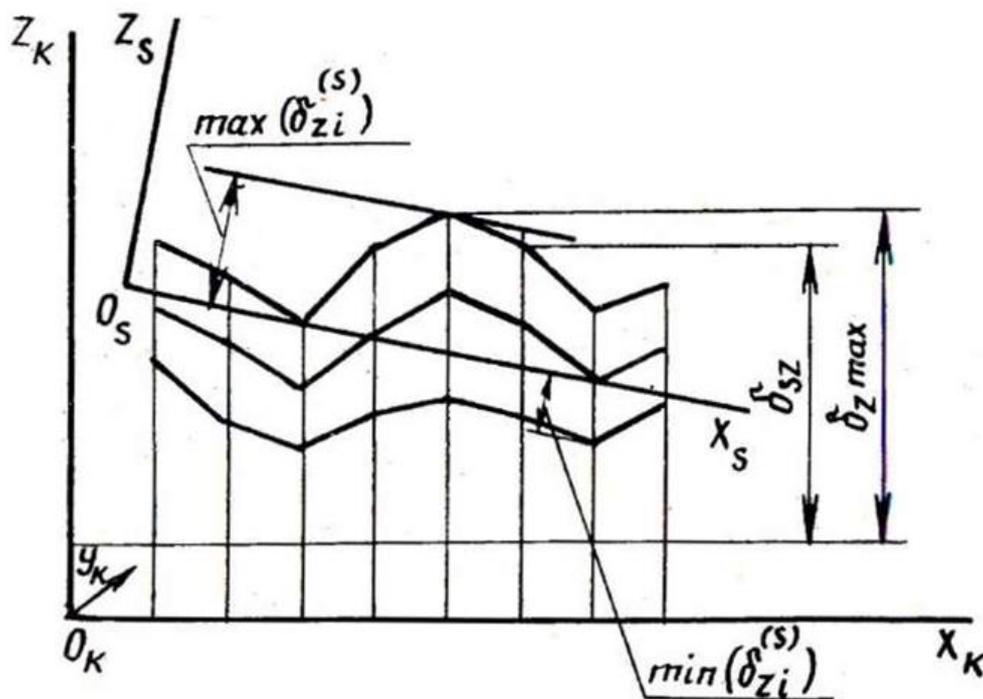


Рис. 7.6. Погрешности обработанной поверхности

Для инженерного использования необходимо иметь обобщенные оценки точности и:

- оценки величин малых смещений начала систем координат и малых поворотов систем координат, связанных с исследуемой поверхностью;
- оценку точности поверхности согласно принятым стандартам;
- оценку точностной надежности станка.

Кроме того, по заданным оценкам точностных параметров необходимо разработать методику расчета величин допусков на составляющие звенья ТО механизмов станков.

Определение положения системы координат, связанной с обработанной поверхностью. Система координат $X_s Y_s Z_s$ связывается с поверхностью S , поэтому повороты ее осей $\{\psi_s\}$ и малые смещения ее начала $\{P_{\delta s}\}$ относительно системы $X_k Y_k Z_k$ можно определить с помощью следующего алгоритма. В системе координат $Y_k Z_k$, связанной с деталью, проводится плоскость $\varphi_z(x, y)$, эксимирующая математическое ожидание поверхности S , которая получена в результате обработки (рис. 7.7).

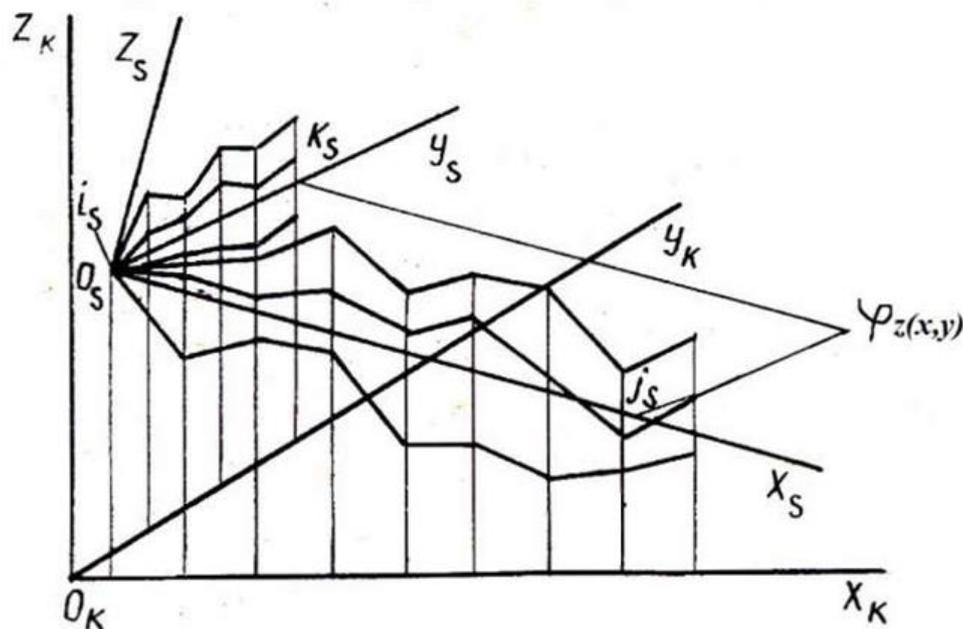


Рис. 7.7. Схема определения положения местной системы координат

Уравнение плоскости в системе координат X_k, Y_k, Z_k будет иметь вид:

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (7.45)$$

а в матричном виде

$$z = [\beta] \{x\}, \quad (7.46)$$

где $[\beta] = [\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2]$ – матрица коэффициентов при неизвестных x_1, x_2 ;

$\{x\} = [x_1 \ x_2]$ – матрица кодированных значений в интервале $(-1, 1)$ неизвестных x, y .

Методом наименьших квадратов определяются коэффициенты $[\beta]$ с помощью матричного соотношения (39)

$$\{\beta\} = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{Y\}, \quad (7.47)$$

где $[X]$ – матрица контролируемых переменных;

$\{Y\}$ – матрица наблюдений;

$\{\beta\}$ – матрица коэффициентов уравнения.

$$[\beta]^T = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{z_u\}, \quad (7.48)$$

где $\{z_u\}$ – вектор – столбец откликов.

При использовании ортогонального планирования коэффициенты можно определить по (7.49)

$$[\beta]^T = \frac{1}{N_u} [X]^T \{z_u\}. \quad (7.49)$$

Переход от кодированных значений переменных x_1, x_2 к фактическим x, y производится по (7.31, 7.32).

Найденная поверхность $\varphi_2(x, y)$ принимается за одну из координатных плоскостей (например, $X_s O Y_s$), на которой выделяются три точки $i_s \ j_s \ k_s$. Принимается также, что начало O_s координат связано с точкой i_s , ось X_s проходит через линию $i_s j_s$, ось Z_s перпендикулярна к плоскости $i_s j_s k_s$, ось Y_s перпендикулярна к плоскости $X_s O_s Z_s$ и направлена так, чтобы система

координат была правой. В этом случае можно использовать функцию преобразования координат [9], что позволяет получить матрицу $[\omega]_{ks}$ конусов углов наклона новых осей по отношению к старым.

Для практических целей представляет интерес вектор $\{\psi_s\} = [\psi_{sx} \ \psi_{sy} \ \psi_{sz}]^T$ малых поворотов новой координатной системы $X_s \ Y_s \ Z_s$ относительно старой $X_k \ Y_k \ Z_k$. Элементы вектора $\{\psi_s\}$ заносятся в матрицу $[\psi]$ преобразования координат [5]:

$$[\psi] = \begin{bmatrix} 1 & -\psi_z & \psi_y \\ \psi_z & 1 & -\psi_x \\ -\psi_y & \psi_x & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.50)$$

Матрицы $[\omega]$ и $[\psi]$ описывают одно и то же преобразование системы координат, поэтому неизвестные, входящие в вектор $\{\psi_s\}$, можно найти на основе равенства матриц $[\omega]$ и $[\psi]$ по (7.51)

$$\begin{aligned} \psi_x &= \cos(\hat{Y}_s \hat{Z}_k); \\ \psi_y &= \cos(\hat{X}_s \hat{Z}_k); \\ \psi_z &= \cos(\hat{Y}_s \hat{X}_k). \end{aligned} \quad (7.51)$$

Вектор $\{P_{\delta s}\}$ определяется по положению точки i_s в системе координат $X_k \ Y_k \ Z_k$.

Оценка показателей точности обработанной поверхности по стандартам. Для оценки параметров точности формы обработанной поверхности изделия необходимо определить положение прилегающей поверхности (прямой, плоскости, окружности). Учитывая это для плоской поверхности, произвольно расположенной в пространстве, принимается, что прилегающая плоскость $p_z(x, y)$ (рис. 7.8) параллельна координатной плоскости $\varphi_x(x, y)$ местной системы координат $X_s \ Y_s \ Z_s$. В таком случае уравнение прилегающей плоскости имеет вид (7.52):

$$p_z(x, y) = \max(\delta_{zi}^{(s)}), \quad (7.52)$$

где $\{\delta_{zi}^{(s)}\}$ – проекция вектора $\{\delta_{si}\}$ в системе координат X_s, Y_s, Z_s для i – й точки поверхности i – й реализации.

Отклонение Δ формы плоских поверхностей (рис. 7.6) равно наибольшему отклонению от прилегающей плоскости:

$$\Delta = \left| \max\{\delta_{zi}^{(s)}\} - \min\{\delta_{zi}^{(s)}\} \right|. \quad (7.53)$$

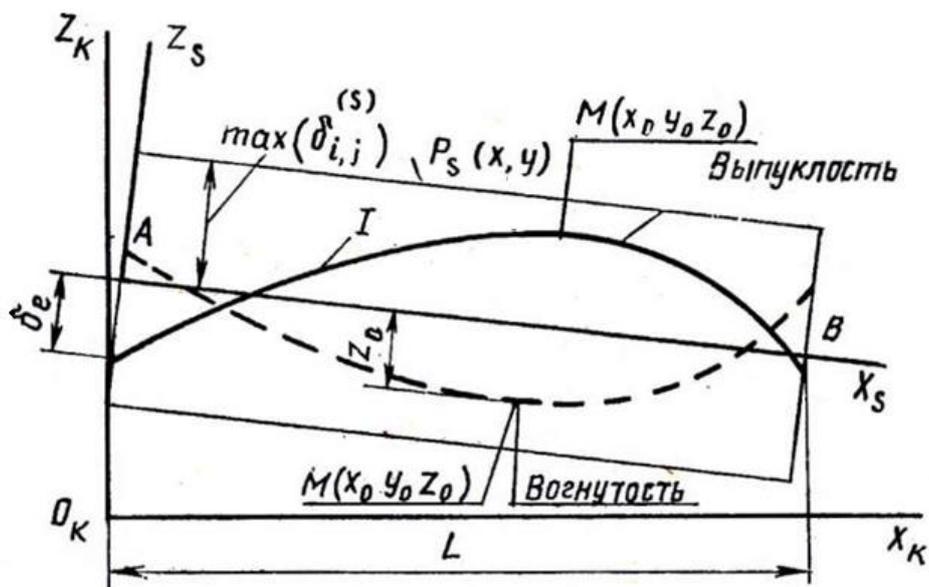


Рис. 7.8. Схема определения положения прилегающей плоскости

Для оценки выпуклости или вогнутости внутри поля допуска в системе координат X_s, Y_s, Z_s методами теории планирования экспериментов используется поверхность второго порядка:

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_2^2, \quad (7.54)$$

где $[\beta]$ – коэффициенты матрицы, которые определяются по (7.49).

Затем производится преобразование уравнения (7.54) к каноническому виду и его геометрическая интерпретация. В результате определяется положение точки $M(x_0, y_0, z_0)$ экстремума. Если имеет место выпуклость (рис. 7.8), то отклонение $\Delta_{\text{вып}}$ можно определить в результате отсчета от прилегающей плоскости $z_{\text{пр}} = p_s(x, y)$:

$$\Delta_{\text{вып.}} = \max(-\delta_l + z_{np}), \quad l=1,2,3,4. \quad (7.55)$$

где $\Delta_{\text{вып.}}$ – отклонение в точках A, B, \dots поля допуска. При вогнутости отклонение

$$\Delta_{\text{вог.}} = -z_0 + z_{np}. \quad (7.56)$$

Аналогично определяется в системе $X_s Y_s$ прилегающая прямая при бочкообразности и седлообразности в продольном сечении для цилиндрической поверхности.

Координаты центра O_l окружности с радиусом R , приближенно описывающей профиль в сечении цилиндрической поверхности в плоскости, перпендикулярной к ее оси, определяются по (7.57)

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i; b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i; R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i, \quad (7.57)$$

где a, b – смещение положения координат центра O_l вдоль осей X и Y от базовой оси Z (рис. 7.9); r_i – фактический радиус-вектор поверхности цилиндра.

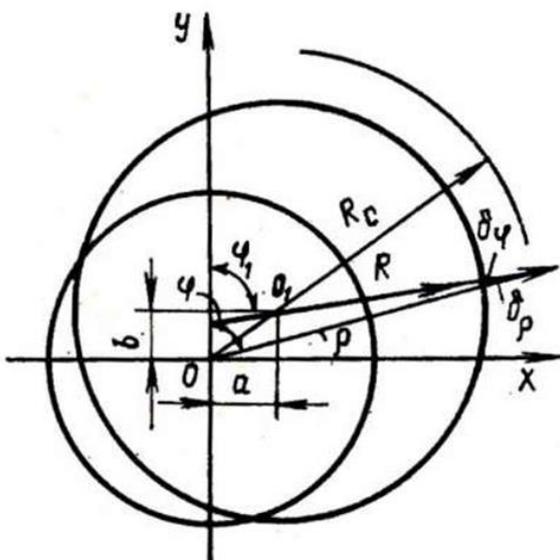


Рис. 7.9. Схема определения погрешности формы цилиндра

Используя известные соотношения преобразования координат при переходе от прямоугольной плоской системы координат X, Y к полярной – ρ, φ , найдем погрешность δ_ρ , направленную по радиусу-вектору ρ . Принимая угол $\varphi = \varphi_1$ и проектируя отрезки $\overline{OO_1}, R, \delta_\varphi$ и δ_ρ на направление радиуса-вектора ρ , получим равенство (7.58), (рис. 7.9):

$$\overline{OO_1} \cos(\varphi - \gamma) + R + \delta_\varphi = \rho + \delta_\rho, \quad (7.58)$$

где δ_φ – погрешность профиля относительно центра; γ – угол между осью Y и отрезком $\overline{OO_1} = C$. Решая уравнение (7.58) относительно δ_φ , можно найти

$$\delta_\varphi = \rho - C \cos(\varphi - \gamma) - R + \delta_\rho. \quad (7.59)$$

Радиус соприкасающегося цилиндра

$$R_c = R + \max(\delta_\varphi). \quad (7.59)$$

Отклонение формы цилиндрической поверхности

$$\Delta_\rho = \max(\delta_\varphi) - \min(\delta_\varphi). \quad (7.60)$$

Овальность и огранка определяются на основании априорных сведений о форме сечения по (7.60) с учетом смещений составляющих на углы 90° и 60° .

Радиальное биение Δ_ρ поверхности вращения относительно базовой оси

$$\Delta_\rho = \max(\delta_{\varphi i}) - \min(\delta_{\varphi i}), \quad i = 1, 2, \dots, m_\varphi. \quad (7.61)$$

где m_φ – число точек исследуемой поверхности.

Торцовое биение

$$\Delta_{zp} = \max(\delta_{xi}) - \min(\delta_{xi}), \quad (7.61)$$

где δ_{xi} – проекция смещения точек торцовой плоскости цилиндра на ось X .

В местной системе координат X_s , Y_s , Z_s находятся прилегающая поверхность P_{np} и поверхности $P_{\partial 1}(x, y)$ и $P_{\partial 2}(x, y)$, характеризующие поле допуска T_δ на отклонение положения поверхности P_{np} . По схеме (рис. 7.10), определяются координаты линий $l_{\partial 2}$ и $l_{\partial 2}$, пересечения плоскости P_{np} и плоскостей $P_{\partial 1}(x, y)$ и $P_{\partial 2}(x, y)$. Если отрезки $l_{\partial 2}$ и $l_{\partial 2}$ расположены в поле

допуска, то отклонение поверхности P_{np} также находится в поле допуска. Отклонение от параллельности осей AB двух цилиндров C_1 и C_2 равно геометрической сумме отклонений Δx и Δy проекций их концов на взаимно перпендикулярные плоскости.

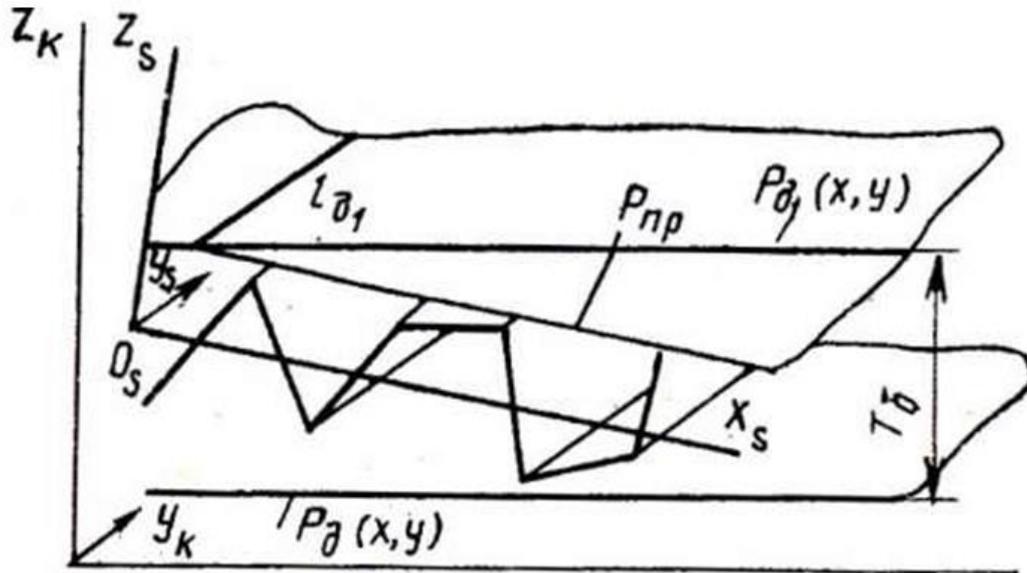


Рис. 7.10. Схема расчета отклонения положения поверхности

Строятся несколько сечений цилиндров плоскостями Q_1, Q_2 , перпендикулярными к базовым осям. В каждом сечении цилиндра определяется положение $a_1, a_2, b_1, b_2, \dots$ центров окружности $O_1^{(1)}, O_1^{(2)}, \dots$ по (7.57) и сравнивается с допускаемыми величинами $T_{\partial x}$ и $T_{\partial y}$.

Допуск на непересечение находится как кратчайшее расстояние между двумя скрещивающимися прямыми по известным зависимостям аналитической геометрии. Допуск на несоосность определяется как наибольшее расстояние между осью рассматриваемой поверхности вращения и общей базовой осью на длине l_n нормируемого участка. Приближенно определение допусков на несоосность в системе координат, связанной с базовой осью, может быть сведено к нахождению отклонения $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ положений центров O_1, O_2, \dots , образованных в результате сечения цилиндрической поверхности плоскостями Q_1, Q_2, \dots , перпендикулярными к ее оси. Оценка несоосности производится по формуле

$$\max(|c_m|) \leq T_\delta, \quad m=1,2,\dots \quad (7.62)$$

Моделирование процесса образования неровностей поверхности при точении. При моделировании процесса образования неровностей поверхности при точении предполагается, что резец перемещается относительно заготовки в соответствии с кинематикой точения и совершает колебания по направлению действия радиальной P_y составляющей силы резания, при этом резец переносит профиль своей вершины в плане на обрабатываемую заготовку [7].

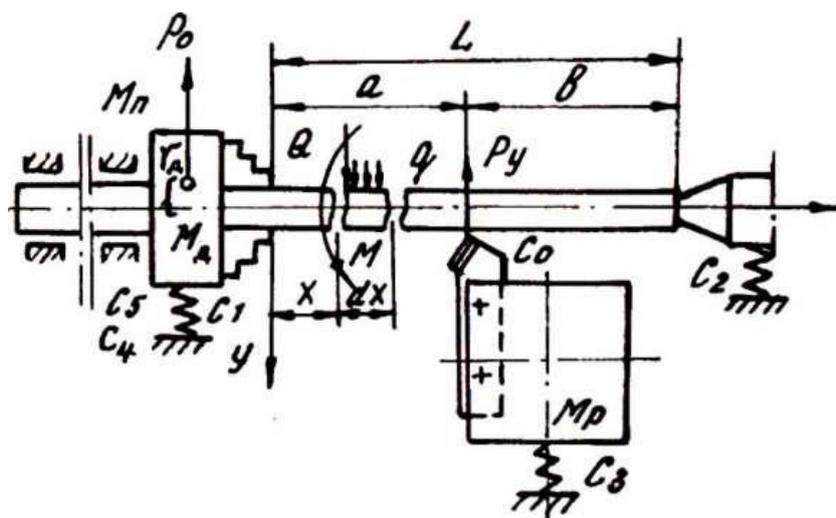


Рис. 7.11. Схема точения заготовки: a – расстояние от места закрепления заготовки до места приложения радиальной составляющей силы резания; M_0 и M_p – масса соответственно патрона и резцедержателя; C_1 , C_5 , C_3 и C_4 – соответственно жесткость передней и задней бабок, жесткость резцедержателя, угловая жесткость передней бабки; M_n , Q и q – соответственно изгибающий момент, перерезывающая сила и распределенная нагрузка элемента единичной длины; C_0 – изменение силы P_y , приходящееся на единицу глубины резания t ; L – длина обработки

На рис. 7.11 показана схема одинарного точения заготовки. К патрону приложена возмущающая сила $P(t) = P_0 \cos(\omega t)$, обусловленная дисбалансом патрона, амплитудное значение которой определяется зависимостью (7.63)

$$P_0 = M_d \omega^2 r_d. \quad (7.63)$$

где M_∂ – масса дисбаланса; r_∂ – расстояние массы дисбаланса от оси вращения; ω – круговая частота вращения патрона.

В связи с неравномерностью перемещений заготовки от вершины резца в процессе точения будет изменяться и глубина резания t , а следовательно, и сила P_y . Исходя из этого

$$C_0 = \partial P_y / \partial t. \quad (7.64)$$

При наличии указанных силовых воздействий упругое перемещение y_1 любой точки заготовки может быть представлено в виде

$$y_1 = \left\{ \begin{array}{l} y_0 K_1(\alpha x) + \frac{\theta_0 K_2(\alpha x)}{\alpha} + \frac{M_0 K_3(\alpha x)}{(\alpha^2 EI)} + \dots \\ \dots + \frac{\theta_0 K_4(\alpha x)}{(\alpha^3 EI)} + \frac{P_0 K_4[\alpha(x - \alpha)]}{(\alpha^3 EI)} \end{array} \right\} \cos(\omega t), \quad (7.65)$$

где K_1 , K_2 , K_3 и K_4 – балочные функции А. Н. Крылова; $\alpha = \left[\frac{m\omega^2}{EI} \right]^{0,25}$;

индексом «0» отмечены значения начальных параметров при $x = 0$; E – модуль упругости; I – момент инерции сечения; m – масса единичного элемента заготовки.

Перемещение вершины резца y_2 в направлении действия силы P_y представлено в виде гармонической функции времени того же периода, что и возмущающая сила:

$$y_2 = y_{20}(x) \cos(\omega t). \quad (7.66)$$

Искомые взаимные перемещения заготовки и вершины резца y_i , определяющие формируемые при точении неровности поверхности, представляются как

$$y_i = y_{1i} + y_{2i}. \quad (7.67)$$

Микрорельеф поверхности моделируется наложением на массив перемещений $\{y_i\}$ (рис. 7.12) профиля вершины инструмента в плане, который приблизительно описывается дугой радиуса r_p (рис. 7.13) [8 – 10].

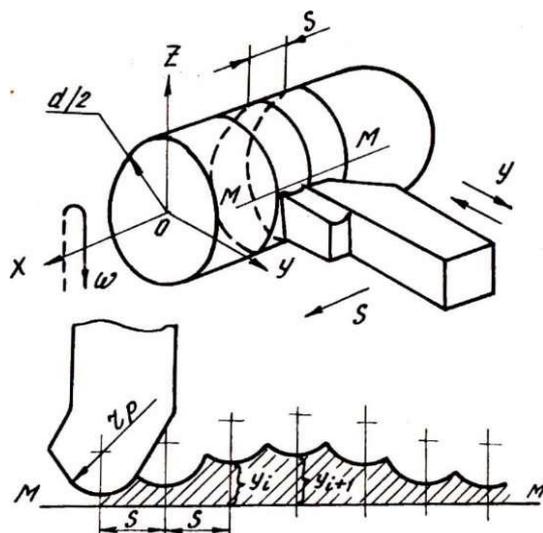


Рис. 7.12. Схемы образования неровностей при точении:

ω – угловая скорость детали; S – направление перемещения инструмента и подача; y – направление упругих перемещений заготовки и инструмента; $M-M$ – трасса снятия профилограммы; y_i и y_{i+1} взаимные перемещения заготовки и инструмента; d – диаметр заготовки; r_p – радиус вершины резца

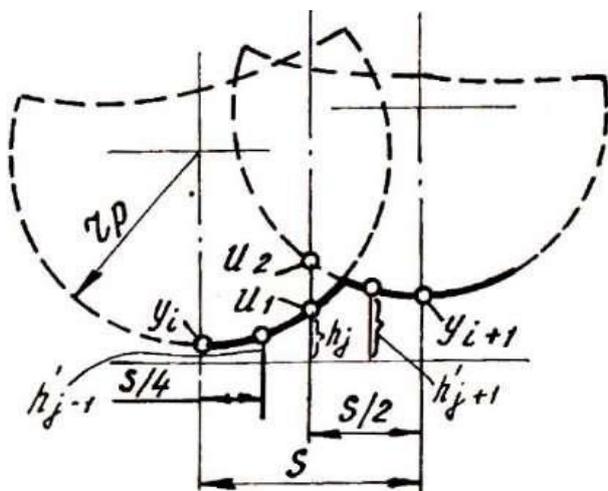


Рис. 7.13. Схема наложения профиля инструмента на массив перемещений

При этом последовательность высот неровностей обрабатываемой поверхности, имитирующая профилограмму, образуется путем добавления к вычисленным ранее массивам перемещений $\{y_i\}$ массива неровностей $\{h_j\}$, определяемого следующим образом. Расстояния между отжатыми y_i и y_{i+1} выбирают равными шагу подачи S при точении. Затем определяют ординаты точек U_1 и U_2 ,

расположенных в середине шага, и исходя из не прерывности профиля выбирают меньшую ординату U , которую принимают за h_j . Из геометрических соображений

$$\begin{aligned}
 h_j &= y_i + \left(r_p - \sqrt{r_p^2 - \frac{S^2}{4}} \right) \approx y_i + \frac{S^2}{(8r_p)}; \\
 h_{j+1} &= y_{i+1} + \frac{S^2}{(8r_p)}; \\
 h_j &= h_{j\min}; \\
 h'_{j-1} &= y_i + \frac{S^2}{(32r_p)}; \\
 h'_{j+1} &= y_{i+1} + \frac{S^2}{(32r_p)}.
 \end{aligned} \tag{7.68}$$

Параметры шероховатости и волнистости рассчитываются с использованием полученной профилограммы. Учитывая вероятностный характер параметров микро – и макронеровностей, в соответствии с физико-технологической теорией образования неровностей деталей [6] параметры профиля описываются усредненными величинами с добавлением их возможных превышений. При этом представляет интерес степень влияния превышений высотных параметров шероховатой поверхности.

Параметр R_a соответствует среднему значению неровностей, параметр R_{max} определяется с использованием крайних значений статистического ряда неровностей («хвостов»). Средние значения (85 %) можно условно принять распределенными нормально, «хвосты» же не подчинены нормальному распределению, и их оценка требует специального подхода.

Поскольку параметр R_a соответствует среднему значению статистического ряда высот неровностей, для оценки его случайных отклонений приемлем критерий Стьюдента t_β со степенью риска $1 - \beta$. Обозначая случайное отклонение параметра R_a через ε , получим

$$\varepsilon \leq t_\beta \sigma(h) \sqrt{n}. \tag{7.69}$$

где $\sigma(h)$ – среднеквадратическое отклонение высоты профиля; n – число дискретных ординат, отображающих профиль.

Поскольку максимальная высота неровностей характеризует их размах, величина $\sigma(h)$ связана с максимальной высотой неровностей R_{\max} зависимостью

$$R_{\max} = K_5 \sigma(h), \quad (7.70)$$

где K_5 – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа ординат n и закона распределения высот неровностей, при $\beta = 0,92 - 0,96$ и числах дискретных ординат неровностей $n = 40 - 100$ коэффициент $K_5 = 2$. Для нормально распределенных величин при числе ординат $n = 40 - 100$ коэффициент $K_5 = 5$.

По данным работы [6], R_p ($R_{\max_{\max}}$) приблизительно в 4 раза превышает среднее значение высоты неровностей. С учетом вышеизложенного зависимость (7.69) можно представить в виде

$$\varepsilon \leq (0,16 \div 0,25) Ra. \quad (7.71)$$

При оценке вариации максимальных неровностей дополним набор дискретных ординат профиля возможным предельным значением максимальной высоты профиля R_p , превышающим среднее значение R_{\max} , полученное по профилограммам. По правилу Ирвина эта величина может быть членом статистического ряда при определенном условии. Пусть критерий Ирвина λ_β , степень риска прогноза $1 - \beta$, число дискретных ординат неровностей n , тогда

$$R_p - R_{\max} \leq \lambda_\beta \sigma(h). \quad (7.72)$$

Используя соотношение Уилкса между размахом и среднеквадратическим отклонением, полученным исходя из позиций непараметрической статистики, имеем

$$R_{\max} = \frac{2(n-1)\sigma(h)}{\sqrt{n-1}}. \quad (7.73)$$

При $1-\beta = 0,05$ величина $\lambda_\beta = 1,1$. Предполагая $n = 40 - 100$ и подставляя эти величины в выражении (7.19) и (7.20), получим

$$\frac{(R_{\max_{\max}} - R_{\max})}{R_{\max}} \leq (0,07 \div 0,11). \quad (7.74)$$

Из анализа зависимостей (7.71) и (7.74) следует, что возможные отклонения средних и крайних значений ординат профиля относительно их средних значений не превышают 25 %. Следует отметить, что точность приборов для измерения шероховатости поверхности находится в пределах 10 %. Допущение погрешности прогноза 25 % позволяет применить для моделирования детерминированный подход, т. е. при прогнозировании свести до минимума учет факторов, обуславливающих появление случайной составляющей профиля неровностей. Допустимость такого подхода к моделированию рельефа поверхности подтверждается экспериментально.

7.6. Математические модели и обобщенные структурные схемы измерительных преобразователей (ИП) и измерительных приборов

Как уже отмечалось раньше, измерительный прибор в отличие от измерительного преобразователя ИП вырабатывает сигнал измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, т.е. имеет дополнительное устройство, позволяющее взять отсчет. Это может быть шкала со стрелкой, цифровой индикатор, электронно-лучевая трубка с координатной сеткой и другие. Эти устройства также являются измерительными преобразователями.

Существует огромное количество разновидностей и типов измерительных приборов, в то время как измерительных преобразователей значительно

меньше. Всё многообразие измерительных приборов получено в результате комбинаций в различных сочетаниях и различными методами измерительных преобразователей. Подразделение измерительных приборов на отдельные ИП значительно облегчает изучение и анализ приборов, позволяет сознательно подходить к построению схемы прибора, выбору метода измерений и анализу погрешностей.

В качестве ИП может быть как одно элементарное звено, например, резистор, преобразующий ток в напряжение, или совокупность звеньев. Основное назначение каждого ИП – преобразование с заданной точностью физических величин. Это может быть преобразование одной физической величины в другую, масштабное преобразование, функциональное преобразование, дифференциальное или интегральное преобразование, умножение или деление и другие.

Совокупность ИП, соединенных между собой и обеспечивающих выполнение необходимых преобразований, составляет измерительную цепь приборов.

Измерительный преобразователь как звено измерительной цепи может иметь один или несколько входов, в зависимости от количества преобразуемых входных величин, и один или несколько выходов. Обозначим ИП в виде, изображенном на рис. 7.14.

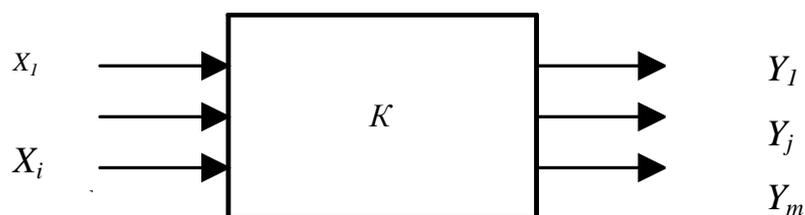


Рис. 7.14. Структурная схема измерительного преобразователя

Каждая из выходных величин определится как

$$y_j = k(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), \quad (7.75)$$

где x_i – входные величины; y_j – выходные величины; k – оператор преобразования.

Наиболее широко представлены ИП, имеющие один вход и один выход: преобразователи одной физической величины в другую, масштабные, интегрирующие и другие. Реже встречаются ИП, имеющие один выход и два или более входов, например, преобразователи, предназначенные для операций умножения и деления, сравнения двух физических величин и другие.

Из обобщенного уравнения преобразования ИП может быть получено уравнение конкретного ИП. Так, для наиболее распространенных ИП с одним входом и одним выходом получим:

$$y = k x. \quad (7.76)$$

Для линейного преобразователя оператор k будет представлять постоянный коэффициент, который определяет чувствительность преобразователя S . Для нелинейного преобразователя $S_{\text{нел}}$ будет зависеть от входной величины $S_{\text{нел}} = S(x)$.

Структурные схемы измерительных приборов могут быть построены на базе уравнения измерений физических величин, представляющего собой операцию сравнения измеряемой аналоговой величины λ с образцовой аналоговой величиной λ_0

$$\lambda^* = L\lambda = \lambda/\lambda_0 \times \lambda_0/\lambda_1, \quad (7.77)$$

где λ^* – результат измерения; L – оператор сравнения с образцовой величиной (мерой); λ_0/λ_1 – априори известное значение образцовой величины, выраженное в установленных единицах; λ_1 – единичное значение величины.

Учитывая развитие процессорных измерительных схем, трансформируя уравнение (7.77), можно записать:

$$\lambda^* = K_1 L K_2 \bar{\gamma}, \quad (7.78)$$

где $\bar{\gamma}$ – входное воздействие на измерительный прибор; K_1 и K_2 – операторы преобразований, выполняемых соответственно в аналоговой и числовой формах; L – оператор сравнения с образцовой величиной.

Обобщенная структурная схема, соответствующая приведенной матема-

тической модели, приведена на рис. 7.15.

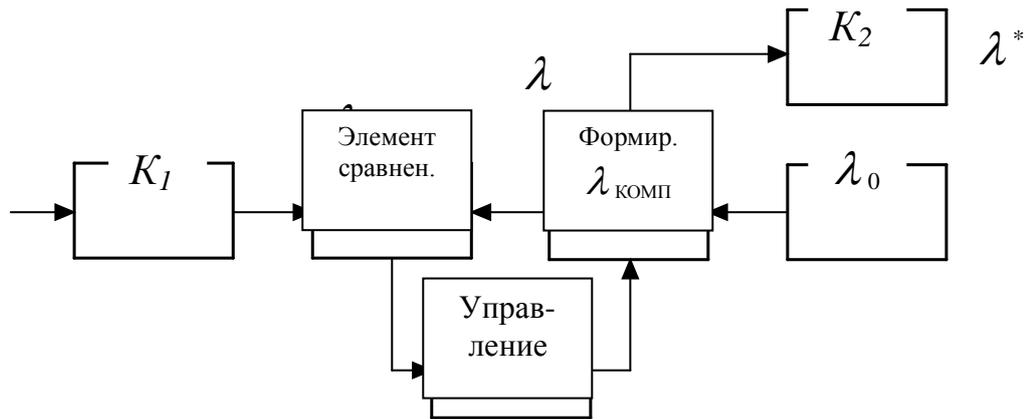


Рис. 7.15. Обобщенная структурная схема математической модели процессорной измерительной схемы

Принципиальным отличием измерительного прибора от измерительного преобразователя является наличие узла, реализующего оператор сравнения с образцовой величиной. Основными элементами указанного конструктивного узла являются элемент сравнения, элемент формирования $\lambda_{\text{комп}}$ и устройство управления.

Важно отметить, что сравнивать возможно только активные физические величины, способные изменять энергетическое состояние вещества или объекта, такие, как сила, момент, напряжение, ток, давление, температура. Пассивные физические величины – сопротивление, индуктивность, емкость, масса, момент инерции, упругость и другие – непосредственно сравнить невозможно, поскольку они не обладают энергией, способной воздействовать на элемент сравнения. Поэтому пассивные величины перед сравнением активизируют, пропуская, например, через сопротивление ток, или воздействуют на массу определенной силой.

Таким образом, процесс измерения требует, в общем случае, не только преобразования измеряемой величины, но и приведения её к виду, удобному для сравнения.

7.6.1. Энергия систем. Обобщенные силы, действующие в системе. Обобщенные скорости

Процесс измерения всегда связан с перераспределением энергии между объектом измерения и средством измерения, поскольку изменение состояния элемента сравнения невозможно без потребления энергии. Как известно из физики, все существующие формы энергии качественно отличны друг от друга, но в то же время они составляют единство, заключающееся в возможности перехода одной формы движения в другую, во взаимных преобразованиях.

Обычно энергию системы можно представить в виде произведения двух сомножителей, одним из которых является обобщенная сила, а другим – обобщенная координата. Но силы, координаты и скорости являются не только средством исследования, но и объектами измерения, например, напряжение, количество электричества, ток, механические сила и момент, линейные и угловые перемещения, линейные и угловые скорости, давления, объемы, расходы и другие величины.

Энергия всякой системы в общем случае является суммой потенциальной и кинетической энергии. В частном случае она может быть только потенциальной или только кинетической. Кроме того, имеют место необратимые потери энергии – рассеяние.

Если обозначить потенциальную энергию системы Π , а обобщенные координаты через g_i , то можно записать

$$\Pi = \frac{1}{2}(c_{11}g_1^2 + c_{22}g_2^2 + \dots) + c_{12}g_1g_2 + c_{23}g_2g_3 + \dots, \quad (7.79)$$

где C_{ki} – коэффициент, не зависящий от координат и имеющий смысл и размерность упругости.

Выражение для кинетической энергии имеет форму

$$T = \frac{1}{2}(m_{11}\dot{g}_1^2 + m_{22}\dot{g}_2^2 + \dots) + m_{12}\dot{g}_1\dot{g}_2 + m_{23}\dot{g}_2\dot{g}_3 + \dots, \quad (7.80)$$

где m_{ik} – коэффициенты, имеющие смысл и размерность массы, которые

называют инерционными.

Обобщенная скорость (\dot{g}_i)

$$\dot{g}_i = \frac{dg_i}{dt}. \quad (7.81)$$

Выражение для энергии, теряемой в системе с несколькими степенями свободы (Φ_R) , имеет вид

$$\Phi_R = \frac{1}{2}(R_{11}\dot{g}_1^2 + R_{22}\dot{g}_2^2 + \dots) + R_{12}\dot{g}_1\dot{g}_2 + R_{23}\dot{g}_2\dot{g}_3 + \dots, \quad (7.82)$$

где R_{ik} – коэффициенты, имеющие смысл и размерность сопротивления потерь, которые можно назвать обобщенными сопротивлениями.

Обобщенные силы (F_i) связаны с запасом потенциальной энергии в системе и могут быть найдены из общего выражения

$$F_i = \frac{\partial \Pi}{\partial g_i}. \quad (7.83)$$

Это равенство может быть использовано для вычисления сил, моментов, напряженностей электрических и магнитных полей.

К активным физическим величинам отнесём обобщенные силы, характеризующие запас потенциальной энергии – энергии, запасённой физическими полями; электрическим, магнитным, гравитационным, а также обобщенные скорости, характеризующие запас кинетической энергии, запасённой инерционными системами.

Остальные обобщенные параметры: координату, массу, сопротивление, упругость – отнесем к пассивным физическим величинам.

Заметим, что активные физические величины – векторные, а пассивные – скалярные.

Активные величины суммируют на основе законов Кирхгофа. Обобщенные скорости суммируются, основываясь на I законе Кирхгофа, при этом они образуют узел уравнивания обобщенных скоростей, в котором алгебраическая сумма обобщенных скоростей равна нулю. Обобщенные силы суммируются, основываясь на II законе Кирхгофа, при этом они образуют кон-

тур уравнивания обобщенных сил и реакций, в котором алгебраическая сумма всех обобщенных сил равна сумме реакций.

7.6.2. Меры в измерительной технике

Как уже указывалось, любое измерение не может быть произведено без сравнения при помощи специального физического эксперимента измеряемой величины с образцовой мерой. При этом может применяться та или иная методика эксперимента. Точность измерений непосредственно зависит от точности мер, участвующих в эксперименте.

Основные требования, предъявляемые к мерам: высокая долговременная стабильность, незначительная чувствительность к внешним воздействиям. Следует отметить, что от меры не требуется, чтобы она воспроизводила значение единицы воспроизводимой величины или кратных ей значений, поскольку, как видно из рис. 7.15, эту функцию может выполнить элемент формирования уравнивающей (компенсирующей) физической величины $\lambda_{\text{комп}}$.

Широко распространены меры как электрических, так и неэлектрических физических величин. Но наиболее простыми по конструкции и зачастую более точными являются меры, воспроизводящие электрические и магнитные величины.

Наиболее распространенные меры неэлектрических величин: меры длины, массы, времени, температуры, силы света, объема и ряд других, например, наборы концевых мер длины, гири и наборы гирь, сосуд для тройной точки воды, платиновый излучатель, мерные сосуды. Некоторые из указанных мер, как меры длины, массы, времени, могут воспроизводить физическую величину с очень высокой точностью, соответственно и измерения с участием указанных мер можно выполнить также точно. Погрешность меры силы света составляет десятые доли процента, следовательно, и погрешность измерения будет не меньше этой величины.

Более универсальными являются меры, воспроизводящие электрические величины.

Измерительные катушки сопротивления используются как однозначные, образцовые меры сопротивления для поверочных целей и как рабочие меры, например, при измерении силы тока по падению напряжения на них. Они изготавливаются на номинальные значения сопротивления в омах, равные 1×10^n , где n – целое число, в пределах от -5 до $+9$. Катушки сопротивления класса 0,01, а также катушки всех классов точности сопротивлением меньше 100 Ом изготавливаются с четырьмя зажимами, два из которых называют токовыми, а два других – потенциальными. Это позволяет избежать погрешности, обусловленной сопротивлениями соединительных проводов и контактов.

В качестве многозначных мер сопротивления используют магазины сопротивлений. Точность их меньше, чем точность однозначных мер сопротивления. Измерительные катушки сопротивления разделяют на следующие классы точности: 0,002; 0,005; 0,01; 0,02 и 0,05 и магазины сопротивлений 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0.

Меры индуктивности выполняют в виде отдельных катушек или магазинов. В образцовой катушке индуктивности медный провод намотан на жёсткий каркас из изоляционного материала. Обмотка пропитана парафином или другим вязким веществом, обеспечивающим постоянство формы и расстояний между витками. Такие катушки изготавливают с номинальными значениями индуктивности 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1 и 1 Гц.

Измерительные катушки взаимной индуктивности имеют две обмотки на общем каркасе. Их изготавливают с номинальными значениями взаимной индуктивности 0,001; 0,01; 0,1 Гн.

Погрешности катушек индуктивности от 0,1 до 1 %, а катушек взаимной индуктивности – от 0,5 до 0,2 %.

Катушки переменной индуктивности и взаимной индуктивности называют вариометрами. Они градуируются в значениях индуктивности и изготавливаются в разных пределах от 2 мкГн до 500 мГц с приведенной погрешно-

стью порядка 0,5 %.

Мерами ёмкости служат воздушные и слюдяные конденсаторы постоянной и переменной ёмкостей. Широко применяют для измерений магазины ёмкостей. Это набор отдельных ёмкостей, включаемых при помощи штепсельного или рычажного устройства. Слюдяные конденсаторы изготавливают на номинальные значения от 0,001 до 1 мкФ, а воздушные – от 1 пФ до долей микрофарады. Погрешность ёмкости образцовых воздушных конденсаторов находится в пределах $\pm (0,03 \div 0,05)$ %, а магазины ёмкостей выпускают следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1.

В качестве образцовой меры ЭДС используют нормальный элемент – специальный гальванический элемент. В зависимости от точности и стабильности их делят на три класса точности: 0,001, 0,002, 0,005. Широкое распространение получили высококачественные стабилизаторы напряжения, которые поверяются с помощью нормальных элементов.

Одними из наиболее точных мер, применяемых в измерительной технике, являются меры частоты электрических колебаний, построенные на базе кварцевых резонаторов. Калибровка их производится с помощью специальных сигналов, передаваемых по радио. Стабильность мер частоты на несколько порядков выше стабильности нормальных элементов. На базе мер частоты получают высокостабильные меры временных интервалов.

В соответствии с точностью мер достигнутая в настоящее время погрешность измерения электрических величин составляет: при измерении постоянных напряжений – $0,002 \div 0,001$ % ; при измерении ёмкости и индуктивности – 0,05 %; при измерении частоты и временных интервалов – 10^{-8} % и менее.

Погрешность измерения частоты и временных интервалов на несколько порядков меньше погрешности измерения других непрерывных электрических величин, что явилось одним из важнейших факторов разработки преобразователей различных величин в частоту электрических колебаний и интервалы времени.

7.7. Синтез измерительных приборов

Измерительные приборы по своему устройству представляют собой совокупность (в определенном сочетании) измерительных преобразователей, что характеризуется структурой прибора. Условным изображением структуры является структурная схема.

В основу синтеза измерительных приборов положим следующие факторы:

1. Любой измерительный прибор содержит контур уравнивания обобщенных сил или узел уравнивания обобщенных скоростей.

2. Сумма обобщенных сил в контуре уравнивания их равна сумме реакций

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0.$$

3. Сумма обобщенных скоростей в узле их уравнивания равна нулю

$$\sum_{i=1}^n \dot{g}_i = 0.$$

В качестве обобщенных сил и скоростей принципиально могут быть выбраны любые активные величины, но на практике с точки зрения удобства сравнения наибольшее распространение получили при уравнивании следующие виды обобщенной силы: механическая сила, механический момент, ЭДС и напряжение. Наиболее распространенными видами обобщенной скорости являются электрический ток, магнитный поток, реже расход жидкости или газа.

Исходя из сказанного, измерительные приборы можно разделить на следующие группы по виду сравниваемых обобщенных сил: с уравниванием механических сил, с уравниванием механических моментов, с уравниванием напряжений и ЭДС, с уравниванием электрических токов, с уравниванием магнитных потоков и другие.

Измерительный прибор содержит как минимум два ИП. Один из них

преобразует измеряемую величину в одну из указанных выше величин, а другой (или несколько других) преобразует образцовую величину в уравновешивающую. Процесс формирования уравновешивающей величины может осуществляться автоматически или вручную оператором.

Группы измерительных приборов, как правило, называют по измеряемой величине и виду обобщенных сил (или скоростей). По указанным признакам измерительные приборы делят на следующие наиболее представительные группы: механические приборы для измерения механических величин; электромеханические приборы; приборы с уравновешиванием напряжений и токов для измерения электрических величин; приборы для измерения неэлектрических величин электрическими приборами уравновешивания (в том числе и цифровые электроизмерительные приборы).

7.7.1. Приборы с уравновешиванием механических сил и моментов

Их отличительной особенностью является наличие контура уравновешивания механических сил или моментов.

Измеряемая величина электрическая или неэлектрическая преобразуется одним или совокупностью ИП в механический момент, реже в механическую силу, воздействующую на элемент сравнения, на второй вход которого подается сформированный уравновешивающий (противодействующий) момент (или сила).

У большинства элементов сравнения подвижная часть имеет только одну степень свободы, т.е. может поворачиваться вокруг неподвижной оси или (значительно реже) совершать линейное перемещение. Положение подвижной части по отношению к неподвижной определяется ее углом поворота, отсчитываемым от некоторого начального положения.

Конструктивно элементы сравнения выполняются в виде оси, закрепленной в опорах, в виде растяжек или подвесов (рис. 7.16).

В первом случае подвижная часть состоит из оси – лёгкой алюминиевой

трубки I диаметром 1 – 1,5 мм, в концы которой запрессованы керны 2 – стальные отрезки длиной 2,5 – 6 мм и диаметром 0,5 – 0,75 мм, заточенные на конце и заканчивающиеся закруглением с радиусом 0,01 – 0,15 мм. Керны располагаются между двумя подпятниками 3 – камнями из твердых синтетических и натуральных материалов: агата, корунда, рубина или специальных сортов стекла, стали или бронзы. Подпятники имеют углубления, в которые упираются керны. Указанный способ крепления требует сравнительно больших вращающего $M_{вр}$ и противодействующего $M_{пр}$ моментов, чтобы уменьшить погрешность, связанную с трением в опорах. Естественно, требуются ИП, создающие $M_{вр}$ 4 и $M_{пр}$ 5 с повышенным потреблением энергии.

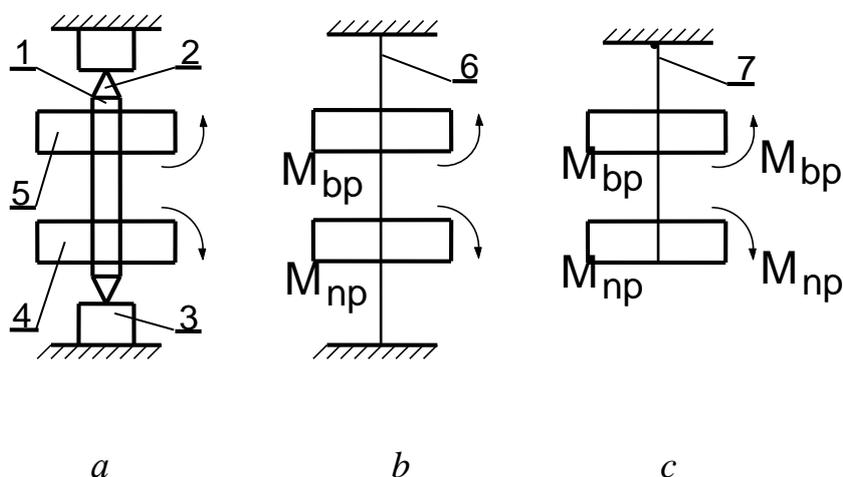


Рис. 7.16. Схемы приборы с уравниванием механических сил и моментов

Уменьшить влияние трения позволяет крепление подвижной части на растяжках 6 – двух металлических нитях прямоугольного, круглого или иного сечения.

У приборов самой высокой чувствительности (гальванометров) подвижная часть подвешивается на конце упругой металлической (иногда кварцевой) нити 7. Такие приборы устанавливают в строго вертикальном положении, для чего они снабжаются уровнем.

Противодействующий момент $M_{пр}$ (или сила $F_{пр}$) создается либо механическим путем (используются упругие свойства пружин, растяжек или подве-

сов), либо при помощи ИП преобразования электрических величин в механические.

Механический противодействующий момент определяется как

$$M_{np} = w \cdot \alpha, \quad (7.84)$$

где w – удельный противодействующий момент; α – угол отклонения подвижной части.

Вращающий момент $M_{вр}$ или силу F для электромеханических преобразователей можно найти как производную электромагнитной энергии $\mathcal{E}_{эм}$, сосредоточенной в ИП, соответственно по углу поворота α или линейному перемещению l подвижной части преобразователя (7.85):

$$M_{вр} = \frac{\partial \mathcal{E}_{эм}}{\partial \alpha}; \quad F = \frac{\partial \mathcal{E}_{эм}}{\partial l}. \quad (7.85)$$

К электромеханической группе, в зависимости от физических явлений, использованных для создания вращающего момента, относятся следующие преобразователи:

а) магнитоэлектрические, основанные на взаимодействии тока и магнитного потока постоянного магнита;

б) электромагнитные, основанные на взаимодействии тока в обмотке с сердечниками из магнитомягкого материала;

в) электростатические, основанные на взаимодействии двух или нескольких электрически заряженных проводников (или диэлектриков);

г) электродинамические, основанные на взаимодействии двух или больше контуров с токами;

д) ферродинамические, основанные на взаимодействии двух или больше контуров с токами, в которых для усиления магнитного поля используются ферромагнитные сердечники (магнитопроводы).

Устройство и конструктивные особенности рассмотренных преобразователей приведены в обширной литературе по электрическим измерениям, например [8].

Остановимся на теории электромеханических ИП. В магнитоэлектрических ИП энергия взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и рамки с током равна

$$\mathcal{E}_{эм} = I \cdot \psi = I \omega S \int_{\alpha_0}^{\alpha} B d\alpha, \quad (7.86)$$

где ψ – потокосцепление; I – ток в рамке; B – магнитная индукция; ω – число витков рамки; S – площадь рамки.

Если поместить рамку в кольцевой воздушный зазор магнитопровода, то можно получить равномерное распределение индукции и (7.86) можно записать

$$\mathcal{E}_{эм} = I \omega S \cdot B \int_{\alpha_0}^{\alpha} d\alpha. \quad (7.87)$$

Тогда вращающий момент $M_{вр}$ определим по формуле (2.13):

$$M_{вр} = B \cdot S \cdot \omega \cdot I. \quad (7.88)$$

Если противодействующий момент создается механическим путем, т.е. при помощи пружин, растяжек или подвесов, и определяется по (7.84), то на основании (7.82) можно записать

$$B \cdot S \cdot \omega \cdot I = \omega \cdot \alpha, \quad (7.89)$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{B \cdot S \cdot \omega}{W} \cdot I. \quad (7.90)$$

Из уравнения (7.90) видно, что в магнитоэлектрическом ИП происходит преобразование тока I в угол отклонения подвижной части α , причем зависимость $\alpha=f(I)$ при равномерной индукции в зазоре и постоянстве w линейная. Это говорит о том, что направление отклонения подвижной части зависит от направления тока, поэтому рассматриваемые ИП без дополнительных преобразователей применяют только в цепях постоянного тока и указывают

полярность подключения.

Чувствительность преобразователя определяем как

$$S_I^\alpha = \frac{d\alpha}{dI} = \frac{B \cdot S \cdot \omega}{W}. \quad (7.91)$$

Она может быть очень высокой, если в магнитной системе применить высококачественные магниты, а подвижную часть крепить на подвесе, чтобы получить малый удельный противодействующий момент. Существуют приборы-гальванометры, позволяющие определить наличие тока в рамке порядка сотен электрон в секунду. Другими методами не только измерить, но и обнаружить такие токи не удается.

Для измерения других физических величин магнитоэлектрическими приборами необходимы дополнительные ИП, преобразующие измеряемую величину в ток. Так, при измерении постоянного напряжения применяют дополнительный резистор, преобразующий напряжение в ток, при измерении переменных напряжений – выпрямители или термопреобразователи и дополнительные резисторы.

Широко применяют, особенно в авиационной технике, магнитоэлектрические приборы, в которых как вращающий, так и противодействующий моменты создаются магнитоэлектрическими преобразователями. С этой целью две жёстко скрепленные под углом рамки закрепляют на одной оси или растяжках и помещают в неравномерное магнитное поле, где индукция есть функция угла поворота рамок $B(\alpha)$. Тогда уравнение (7.89) может быть записано как

$$B_1(\alpha) \cdot S_1 \cdot \omega_1 \cdot I_1 = B_2(\alpha) \cdot S_2 \cdot \omega_2 \cdot I_2,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2(\alpha) \cdot S_2 \cdot \omega_2}{B_1(\alpha) \cdot S_1 \cdot \omega_1} = f(\alpha), \quad (7.92)$$

или

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (7.93)$$

Угол отклонения подвижной части есть функция отношения токов в рамках. Такие устройства называют логометрами. Они нашли широкое распространение в авиации благодаря следующему свойству. Если токи I_1 , и I_2 есть функции сопротивлений резистивных датчиков и напряжения питания этих датчиков

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2},$$

то

$$\alpha = F\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7.94)$$

Следовательно, показания логометров не зависят от значения напряжения питания, что важно при питании от бортовой сети летательного аппарата, напряжение которой может изменяться в широких пределах.

Конструктивное выполнение магнитоэлектрических логометров может быть различным [8], но теория их расчета общая.

Электромагнитные ИП по сути представляют электромагниты различного конструктивного выполнения [8], но для всех характерно то, что при изменении положения ферромагнитного сердечника в катушке с током изменяется индуктивность последней, соответственно и энергия системы

$$Y_{yi} = \frac{1}{2} i^2 \cdot L, \quad (7.95)$$

где i – мгновенное значение тока в катушке; L – индуктивность катушки, зависящая от угла поворота подвижной части ИП с ферромагнитным сердечником.

Согласно (7.81), мгновенное значение вращающего момента равно

$$M_{\text{эпт}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (7.96)$$

В полученное уравнение ток I входит во второй степени, следовательно, вращающий момент не зависит от направления тока. Поэтому такие преобразователи можно использовать для преобразования как постоянных, так и переменных токов.

Значение вращающего момента для постоянного тока будет

$$M' = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (7.97)$$

Определим вращающий момент при работе на переменном токе.

Пусть

$$i = I_m \sin \omega t,$$

тогда мгновенное значение

$$M_{\text{эпт}} = \frac{1}{2} I_m^2 \sin^2 \omega t \frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_m^2}{2} - \frac{I_m^2}{2} \cos 2\omega t \right) \frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} - \frac{1}{2} I^2 \cos \omega t \frac{dL}{d\alpha}, \quad (7.98)$$

т.е. содержит две составляющие – постоянную и переменную с частотой 2ω .

Благодаря инерционным свойствам, подвижная часть ИП реагирует лишь на среднее значение вращающего момента (будет рассмотрено ниже, при изучении динамических свойств приборов)

$$M_{\text{эпр}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{эпт}} dt = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (7.99)$$

Сравнивая (7.98) и (7.99), видим, что если действующее значение переменного тока и величина постоянного тока равны, то равны и вращающие моменты. Это важное свойство позволяет сделать электромагнитные приборы, работающие как на постоянном, так и на переменном токе, а также осуществлять поверку и градуировку на постоянном токе, используя более точные меры.

Противодействующий момент в электромеханических приборах создают

обычно при помощи пружин или растяжек. В этом случае

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \quad (7.100)$$

где I – постоянный ток или действующее значение переменного тока.

Из (7.100) видно, что α входит как в правую, так и в левую части уравнения, следовательно, функция преобразования нелинейная, но конструктивными методами, придавая определенную форму ферромагнитному сердечнику, можно получить линейность преобразования в диапазоне 20÷100 % от предела изменения преобразуемой величины.

Приборы могут обладать большой перегрузочной способностью по току, поскольку он протекает по неподвижной катушке, которая может быть выполнена из сравнительно толстого провода. Электромагнитные приборы и ИП, как видно из (7.100), непосредственно могут измерять или преобразовывать постоянные и переменные токи. Для измерения других физических величин необходимы дополнительные ИП, преобразующие их в ток: добавочные резисторы, делители тока и напряжения, трансформаторы и другие.

Ограничение точности электромагнитных приборов связано с остаточным намагничиванием ферромагнитных сердечников.

Электростатические ИП представляют собой специально выполненные конденсаторы переменной емкости [8].

Энергия, запасенная конденсатором, равна

$$\mathcal{E}_{эм} = \frac{1}{2} u^2 C, \quad (7.101)$$

где u – мгновенное значение напряжения на обкладках конденсатора; C – емкость конденсатора, зависящая от α .

Зависимости (7.97) и (7.101) дуальны, поскольку дуальны ёмкость и индуктивность, напряжение и ток, следовательно, выводы, сделанные при анализе электромагнитных ИП и приборов, справедливы и для электростатических.

Функция преобразования может быть записана как

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}, \quad (7.102)$$

где U – постоянное напряжение, или действующее значение переменного.

В отличие от электромагнитных, электростатические ИП преобразуют напряжение, а не ток, следовательно, при преобразовании или измерении других физических величин необходимы дополнительные ИП, преобразующие их в напряжение.

В подавляющем большинстве случаев электростатические приборы применяют для измерения напряжений от десятков вольт и выше. Характеристики электростатических вольтметров, особенно по входному сопротивлению, близки к идеальным.

Проверка их осуществляется при помощи точных мер и образцовых приборов на постоянном токе, что обеспечивает их малые погрешности. Классы точности электростатических вольтметров могут быть 0,05 и менее. Недостаток их – существенное влияние внешних электрических полей, даже при наличии электростатических экранов. Это связано с малой энергией, запасаемой системой, так как емкость C имеет значение порядка единиц пикофарад.

Электродинамические и ферродинамические ИП и приборы основаны на взаимодействии контуров с токами. С конструктивными особенностями их можно ознакомиться в [8].

Энергия взаимодействия двух контуров с токами

$$Y_{\text{вт}} = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} \pm M_{1,2} \cdot i_1 \cdot i_2, \quad (7.103)$$

где L_1, L_2 – соответственно индуктивности первого и второго контуров; i_1, i_2 – мгновенные значения токов в контурах; $M_{1,2}$ – взаимная индуктивность между контурами. Если одна из катушек будет неподвижной, а вторая подвижной, то изменение их взаимного расположения – функции α – приведет к изменению $M_{1,2}$, а L_1 и L_2 будут оставаться постоянными.

Тогда мгновенный вращающий момент, определим как

$$M_{\text{эпт}} = i_1 \cdot i_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (7.104)$$

Если токи постоянные, то он равен

$$M_{\text{эп}} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (7.105)$$

Если же по катушкам пропускать переменные токи, изменяющиеся синусоидально, то

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad \text{и} \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi),$$

вращающий момент будет изменяться во времени

$$M_{\text{эпт}} = I_1 I_2 \cos \varphi \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} - I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cos(2\omega t - \varphi), \quad (7.106)$$

а среднее значение вращающего момента будет

$$M_{\text{эп}} = I_1 I_2 \cos \varphi \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (7.107)$$

Противодействующий момент обычно создают пружинами и растяжками. Тогда функция преобразования запишется как

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \varphi \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \quad (7.108)$$

при работе на переменном токе и

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \quad (7.109)$$

на постоянном.

Анализируя уравнения (7.108) и (7.109), можно сделать следующие выводы:

1. Если катушки соединить последовательно, то токи I_1 и I_2 будут рав-

ны, а $I_1=I_2=I$. Функция преобразования примет вид, независимо от того, какой ток – постоянный или переменный,

$$\alpha = \frac{1}{W} I^2 \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (7.110)$$

Следовательно, непосредственно можно измерять или преобразовывать токи, а при наличии дополнительных ИП и другие физические величины. Например, подключив последовательно дополнительный резистор, можно измерять напряжения.

2. Преобразователь осуществляет операцию умножения токов. Используя это свойство, можно разрабатывать приборы для измерения некоторых величин прямыми методами вместо косвенных. Среди таких приборов наибольшее распространение получили электродинамические и ферродинамические ваттметры. Они содержат два дополнительных преобразователя. Один из них преобразует ток нагрузки в ток I_1 , (часто этот преобразователь отсутствует, и по катушке пропускается ток нагрузки $I_n = I_1$), а второй преобразует напряжение на нагрузке в ток $I_2 = K U_n$. Тогда

$$\alpha = \frac{k}{W} I_n U_n \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cdot \cos \phi \quad (7.111)$$

на переменном токе и

$$\alpha = \frac{k}{W} I_n U_n \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \quad (7.112)$$

на постоянном.

3. Точность приборов может быть высокой, так как есть возможность поверки и градуировки их на постоянном токе.

7.7.2. Динамические свойства измерительных преобразователей и приборов

Энергия, поступающая на вход ИП или прибора, может преобразовываться из одного вида в другой, накапливаться, расходоваться и перераспределяться между элементами устройств, такими, как подвижные части, характеризующиеся массой и моментом инерции, пружины, индуктивные элементы,

ёмкости. При наличии таких элементов в средствах измерений возникают переходные процессы при любом изменении входной величины, что является причиной появления динамических погрешностей. Следовательно, ИП или прибор представляют динамическую систему, которая описывается дифференциальным уравнением соответствующего порядка. Динамические свойства приборов определяются в результате решения этих уравнений. Кроме дифференциальных уравнений, динамические характеристики определяют: передаточная функция, частотные амплитудно – фазовые характеристики, переходная и импульсная функции.

Подробно динамические свойства приборов, как систем автоматического управления, рассматриваются в дисциплине «Теория автоматического управления», но не рассматриваются некоторые важные аспекты, касающиеся применения некоторых динамических свойств для целей измерения, анализа динамических погрешностей и связи их со статическими погрешностями.

Большинство звеньев ИП и приборов могут быть описаны дифференциальными уравнениями первого или второго порядков. Более высокие порядки уравнений получаются, как правило, в результате комбинаций звеньев первого и второго порядков. Так, например, рассмотренные выше приборы с уравновешиванием обобщенных сил описываются дифференциальным уравнением второго порядка

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = M_{врт}, \quad (7.113)$$

где J – момент инерции подвижной части приборов; P – коэффициент успокоения (демпфирования); W – удельный противодействующий момент; α – угол отклонения; $M_{врт}$ – мгновенное значение вращающего момента. Момент инерции определяется массой и геометрией подвижной части ИП, удельный противодействующий момент – упругими свойствами пружин, растяжек или подвесов, а коэффициент успокоения определяется трением подвижной части о воздух и вводится искусственно при помощи

специальных устройств – успокоителей или демпферов.

Он оказывает влияние только на динамические характеристики, не искажая статических.

Запишем уравнение (7.113) в виде

$$\frac{J}{W} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{P}{W} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = \frac{1}{W} M_{спt}, \quad (7.114)$$

которое при $t \rightarrow \infty$ примет вид (переходные процессы закончатся, а скорость и ускорение станут равными нулю)

$$\alpha = \frac{1}{W} M_{сп}, \quad (7.115)$$

т.е. получим статическое уравнение ИП – частное решение дифференциального уравнения.

Динамические свойства собственно преобразователя определяются коэффициентами его левой части. Найдем общее решение уравнения (7.114), для чего составим его характеристическое уравнение

$$\frac{J}{W} r^2 + \frac{P}{W} r + 1 = 0, \quad (7.116)$$

и найдем его корни

$$r_{1,2} = -\frac{P}{2I} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J}}. \quad (7.117)$$

Если колебательная система не имеет потерь ($P=0$), то величина $\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$ определяет резонансную угловую частоту колебаний системы.

Вынесем за скобки величину ω_0 в уравнении (7.116)

$$r_{1,2} = \omega_0 \left(-\frac{P}{2\sqrt{JW}} \pm \sqrt{\left(\frac{P}{2\sqrt{JW}} \right)^2 - 1} \right) = \omega_0 \left(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1} \right), \quad (7.118)$$

где $\beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}}$ – степень успокоения (степень демпфирования, относительный коэффициент затухания), определяющая потери энергии.

В зависимости от значения степени успокоения различают три режима движения:

1) при $\beta < 1$ корни характеристического уравнения комплексные сопряженные, что свидетельствует о колебательности движения;

2) при $\beta > 1$ оба корня вещественные и разные, следовательно, движение апериодическое;

3) при $\beta = 1$ оба корня вещественные и равные, что соответствует граничному случаю, представляющему для практики особый интерес.

При критическом успокоении подкоренное выражение уравнения (7.117) равно нулю

$$\frac{P_{кр}^2}{4J^2} - \frac{W}{J} = 0, \quad (7.119)$$

откуда найдем, что

$$P_{кр} = 2\sqrt{JW}. \quad (7.120)$$

Из (7.120) видно, что критический коэффициент успокоения определяется параметрами элементов системы, способными к накоплению энергии. Как правило, эта величина для конкретного прибора фиксирована и связана со статическими характеристиками ИП.

Изменение степени успокоения $\beta = P/P_{кр}$ с целью получения необходимого режима движения осуществляется изменением коэффициента успокоения P , который, как следует из (7.113), является коэффициентом при скорости. От него зависит значение момента успокоения

$$M_y = P \frac{d\alpha}{dt}. \quad (7.121)$$

Для создания M_y применяют процессы с рассеиванием энергии, напри-

мер, при движении твердых тел в газообразных и жидких средах (воздушные и жидкостные успокоители), при движении короткозамкнутых контуров в магнитном поле (индукционные успокоители).

Одна из важных динамических характеристик измерительных приборов, время установления показаний t_y , тесным образом связана со степенью успокоения β и периодом собственных колебаний системы:

$$T_c = \frac{T_0}{\sqrt{1-\beta}}.$$

Если зададим динамическую погрешность равной 1 %, то время, за которое выходная величина достигнет уровня $0,99\alpha_{уст}$, называют временем установления показаний (временем успокоения).

При $\beta < 1$ время успокоения может быть оценено по экспериментально полученной зависимости (7.122)

$$t_y \approx \frac{3}{4} \frac{T_0}{\beta} \quad (7.122)$$

а при $\beta > 1$ по (7.123)

$$t_y \approx \frac{3}{2} \beta \cdot T_0. \quad (7.123)$$

Установлено, что наиболее выгодное с точки зрения быстродействия значение β равно 0,7 – 0,9.

Следовательно, для увеличения быстродействия необходимо уменьшать период собственных колебаний системы (или увеличивать частоту), что может быть достигнуто (7.117) уменьшением момента инерции (обобщенной массы) или увеличением удельного противодействующего момента,

Но такие мероприятия, как видно из уравнения (7.90), приводят к уменьшению чувствительности ИП, причем уменьшение чувствительности происходит интенсивнее, чем уменьшение периода собственных колебаний. Кроме того, уменьшается запас энергии в системе (энергоемкость системы),

что приводит к уменьшению помехоустойчивости.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

- 1) статические и динамические характеристики ИП и приборов связаны между собой. Улучшение динамических характеристик, как правило, приводит к ухудшению статических, т.е. возможен своеобразный обмен качеством;
- 2) для улучшения статических характеристик и помехозащищенности необходимо увеличивать энергоёмкость системы;
- 3) для улучшения динамических свойств ИП необходимо уменьшать энергоёмкость системы.

Возникающие противоречия разрешаются конструктором при разработке конкретного прибора с учетом условий его применения.

Если все конструкторские приемы исчерпаны, а статические и динамические характеристики всё равно не удовлетворяют требованиям технического задания на разработку устройства, то в него дополнительно вводят корректирующие элементы, способствующие уменьшению периода собственных колебаний системы, или усилители, позволяющие увеличить энергоёмкость системы.

Очень важными для анализа средств измерений являются амплитудно-фазочастотные характеристики.

Для ИП, описываемых дифференциальными уравнениями второго порядка, они имеют вид

$$\alpha(j\omega) = \frac{M_{ep}}{W} \frac{1}{1 - \frac{J}{W}\omega^2 + j\omega\frac{P}{W}} = \frac{M_{ep}}{W} \frac{1}{1 - k^2 + j 2k\beta}, \quad (7.124)$$

где ω – текущая угловая частота; $k = \omega/\omega_0$ – относительная частота.

Отсюда амплитудно-частотная характеристика

$$\alpha(\omega) = \frac{M_{ep}}{W} \frac{1}{\sqrt{(1 - k^2)^2 + 4\beta^2 k^2}}, \quad (7.125)$$

а фазочастотная

$$\phi(\omega) = -\arctg \frac{2\beta k}{1-k^2}. \quad (7.126)$$

На рис. 7.17 приведено семейство кривых, соответствующих уравнению

$$\frac{\alpha(\omega)}{\frac{M_{ep}}{W}} = \frac{1}{\sqrt{(1-k^2)^2 + 4\beta^2 k^2}}. \quad (7.127)$$

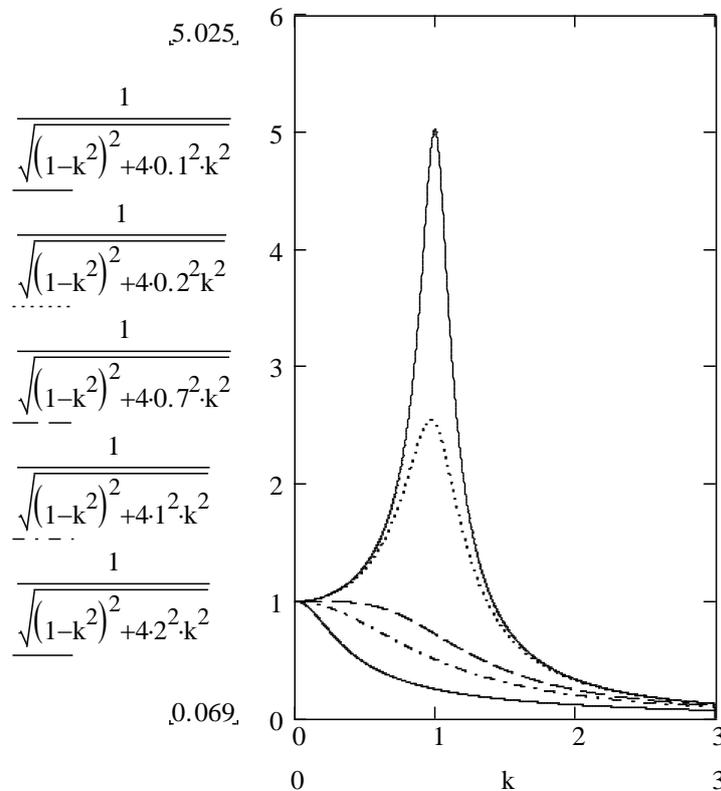


Рис. 7.17. Семейство амплитудно-частотных характеристик, соответствующих уравнению (7.127)

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

1) чувствительность преобразователей уменьшается с возрастанием частоты ω , что свидетельствует о фильтрующих свойствах ИП и приборов, описываемых дифференциальными уравнениями второго (как и других) порядка, причем характеристики фильтра могут быть изменены путем изменения величин W , J , P , β .

2) ИП и приборы, имеющие приведенные характеристики, могут быть использованы для коррекции динамических характеристик других ИП, нахо-

дящихся в одной с ними измерительной цепи;

3) резкое возрастание чувствительности на резонансной частоте при малых значениях степени успокоения используется при разработке высокочувствительных селективных устройств сравнения переменного тока – вибрационных гальванометров;

4) при степени успокоения $\beta = 0,6 \div 0,8$ имеется участок с постоянной чувствительностью в диапазоне частот, примерно равном $(0 \div 0,4) \omega_0$, что широко используется при разработке вибраторов (гальванометров) электромеханических осциллографов, предназначенных для записи различных величин, изменяющихся во времени.

График, характеризующий частотную погрешность, будет выглядеть аналогично изображенному на рис. 7.17, с той лишь разницей, что ось абсцисс будет сдвинута вверх на единицу.

Важнейшей динамической характеристикой ИП и приборов является передаточная функция, которая для рассматриваемых систем второго порядка равна

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{M_{ep}(p)} = \frac{1}{W} \frac{1}{\frac{J}{W} p^2 + \frac{P}{W} p + 1} = \frac{1}{W} \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2\beta \frac{1}{\omega_0} p + 1}. \quad (7.128)$$

Достаточно подробно такие передаточные функции исследуются в теории автоматического управления.

Анализ передаточной функции приводит к выводам, сделанным выше при исследовании переходной функции и амплитудно – фазочастотных характеристик, что вполне естественно, поскольку имеем дело с различными формами представления одного и того же процесса.

Рассмотрим два особых случая применения динамических характеристик в измерительных цепях.

Если электромеханический ИП выполнить таким образом, чтобы момент инерции был большим, а коэффициент успокоения малым, то уравнение (7.128) можно записать как

$$W(p) = \frac{1}{W} \frac{1}{\frac{J}{W} p^2 + 1}, \quad (7.129)$$

т.е. получим колебательное звено с медленно затухающей амплитудой колебаний. Известна связь амплитуды колебания такой системы и энергии, поступившей в нее в виде короткого импульса ($t_u \leq 0.1 T_0$)

$$\mathcal{E} = c \alpha_m^2, \quad (7.130)$$

где c – коэффициент, зависящий от параметров системы. Указанное свойство используют при разработке баллистических гальванометров, применяемых, например, при магнитных измерениях.

Основной недостаток баллистического гальванометра – необходимость получения коротких импульсов напряжения или тока, подаваемых на его вход.

Если ИП выполнить с очень малым удельным противодействующим моментом, закрепив подвижную часть при помощи безмоментных растяжек или подвесов, то получим

$$W(p) = \frac{1}{P(Jp + p)}. \quad (7.131)$$

Введём дополнительное условие: малый момент инерции и большой коэффициент успокоения (успокоители обычно индукционные), тогда с некоторой погрешностью уравнение (7.131) можно записать как

$$W(p) = \frac{1}{P} \cdot \frac{1}{p}, \quad (7.132)$$

т.е. получим интегрирующее звено с коэффициентом усиления $1/P$.

Такие преобразователи хорошо согласуются с дифференцирующими ИП, например, с измерительными катушками, предназначенными для измерения магнитного потока Φ индукционным методом. Передаточная функция их

$$W(p)_{ик} = w_{ик}P, \quad (7.133)$$

где $W_{ик}$ – число витков измерительной катушки.

Соединив последовательно оба звена, получим безынерционное звено. Следовательно, имеется возможность непрерывного преобразования магнитного потока в перемещение. Приборы такого типа называют веберметрами. Они широко распространены в технике магнитных измерений.

7.7.3. Коррекция динамических характеристик измерительных преобразователей

Вопросы коррекции динамических характеристик изучаются в теории автоматического управления. Основной целью при этом является обеспечение заданного запаса устойчивости и необходимого качества переходных процессов.

Коррекция динамических характеристик ИП в измерительной технике преследует иную цель: получение динамических характеристик, подобных тем, которыми обладал ИП до коррекции, но с меньшими постоянными времени. Тогда любой динамический процесс при его оценке по любому критерию воспроизводится скорректированным ИП лучше, чем нескорректированным [9].

Рассмотрим некоторые пути решения задач коррекции. Условимся обозначать передаточную функцию ИП до коррекции $W(p)=s\nu$, после коррекции $W_k(p) = s_k\nu_k$, корректирующего звена $W_{кз}(p) = s_{кз}\nu_{кз}$, где $S, S_k, S_{кз}$ – коэффициенты усиления соответствующих звеньев, а $\nu, \nu_k, \nu_{кз}$ – их собственные динамические характеристики. Например, для термопары

$$W(p) = \frac{s}{1+Tp}; \quad \nu = \frac{1}{1+Tp}. \quad (7.134)$$

Различают последовательную и параллельную коррекции. При последо-

вательной коррекции корректирующее звено может быть включено как перед корректируемым, так и после него, но независимо от этого

$$W_k(p) = W_{кз}(p) \cdot W(p) = s_{кз} \cdot s \cdot v_{кз} \cdot v = s_k v_k . \quad (7.135)$$

Из полученного уравнения видно, что задача коррекции заключается в подборе такой схемы корректирующего звена, у которой динамическая характеристика $v_{кз}$, умноженная на V , даст функцию v_k , подобную v , но с меньшими постоянными времени.

Пусть для инерционного звена первого порядка (7.134) требуется уменьшить постоянную времени в n раз, т.е. получить относительную передаточную функцию скорректированного звена

$$v_k = \frac{1}{1 + nTp} .$$

Из условия (7.135) находим

$$v_{кз} = \frac{v_k}{v} = \frac{1}{1 + nTp} : \frac{1}{1 + Tp} = \frac{1 + Tp}{1 + nTp} . \quad (7.136)$$

Такой метод используется, например, для коррекции динамических характеристик термопар. Схема устройства, реализующего данный метод, изображена на рис. 7.18.

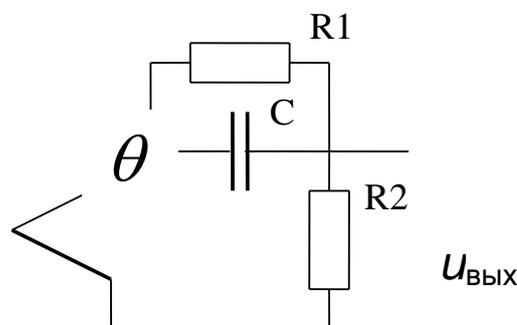


Рис. 7.18. Схема коррекции динамических характеристик термопар

Динамическая характеристика корректирующего звена

$$V_{кз} = \frac{1 + \tau p}{1 + \tau n p}, \quad (7.137)$$

где $\tau = R_1 C$; $n = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

Если рассчитать схему корректирующего звена так, чтобы $\tau = T$, то получим

$$V_k = \frac{1}{1 + n T p}. \quad (7.138)$$

Такой способ коррекции позволяет на порядок уменьшить постоянную времени термопреобразователей.

Для динамических звеньев второго порядка

$$V_{кз} = \frac{V_k}{V} = \frac{1 + \frac{2\beta}{\omega_0} p + \frac{1}{(\omega_0)_k^2} p^2}{1 + \frac{2\beta_k}{(\omega_0)_k} p + \frac{1}{(\omega_0)_k^2} p^2}. \quad (7.139)$$

Результатом коррекции при $\beta = \beta_k$ должно быть $(\omega_0)_k > \omega_0$, т.е. более широкая полоса частот. Указанный способ позволяет расширить рабочую полосу частот на половину порядка.

Использование для коррекции последовательного включения звеньев связано со следующими недостатками: снижения чувствительности всего преобразователя и увеличение чувствительности к помехам и дестабилизирующим факторам.

При параллельной коррекции возможны два варианта направленности действия корректирующего звена: от входа к выходу и от выхода к входу, структурные схемы которых изображены соответственно на рис. 7.19 и 7.20.

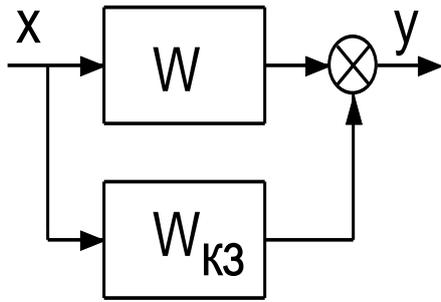


Рис. 7.19. Схема параллельной коррекции с направлением действия корректирующего звена от входа к выходу

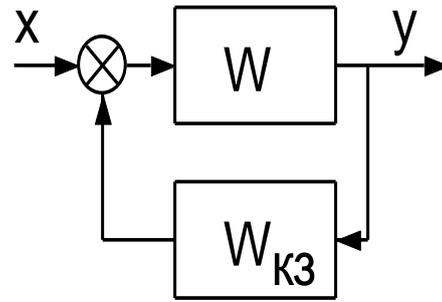


Рис. 7.20. Схема параллельной коррекции с направлением действия корректирующего звена от выхода к входу

Соответствующие варианты соединения звеньев называют прямой и обратной связями. Результат коррекции при прямой связи

$$W_k(p) = W(p) + W_{кз}(p). \quad (7.140)$$

Рассмотрим вариант коррекции динамической характеристики термопреобразователя с передаточной функцией апериодического звена первого порядка

$$W(p) = \frac{s}{1 + Tp}.$$

Целью коррекции является получение безынерционного звена с коэффициентом усиления S .

Из (7.140) находим передаточную функцию корректирующего звена

$$W_{кз}(p) = W_k(p) - W(p) = s \frac{Tp}{1 + Tp}, \quad (7.141)$$

откуда видно, что корректирующее звено состоит из звена, подобного корректируемому, и последовательно соединенного с ним дифференцирующего звена с постоянными времени, равными постоянной времени корректируемого звена. Таким же образом определяются передаточные функции корректирующих звеньев для ИП, описываемых более сложными зависимостями.

Структурная схема устройства изображена на рис. 7.21, откуда видно, что для коррекции нет необходимости в звене, воспроизводящем зависимость (7.141), а достаточно только дифференцирующего звена, на вход которого подается выходной сигнал корректируемого ИП.

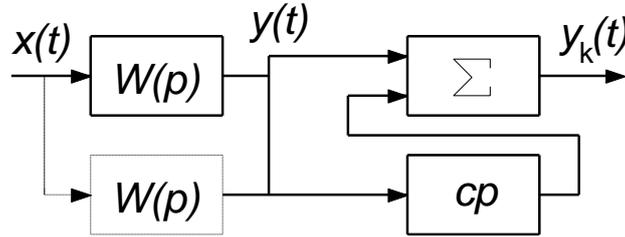


Рис. 7.21. Структурная схема устройства ИП

При обратной связи результат коррекции определяют как

$$W_k(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W(p) \cdot W_{кз}(p)}. \quad (7.142)$$

Формула (7.142) в общем виде не даёт представления о том, как при обратной связи получаются подобные по структуре функции y_k и y . Вопросы коррекции динамических характеристик преобразователей с обратными связями изучаются в теории автоматического управления. Эффективным приёмом улучшения метрологических характеристик электромеханических приборов является предварительное усиление измеряемой или промежуточной величины, что позволяет увеличить мощность, поступающую на подвижную часть, а следовательно, за более короткое время система запасет необходимую энергию. Для этой цели наиболее часто применяют электронные усилители. Такие приборы называют электронными, например: электронные вольтметры, электронные амперметры и другие. Измерительный прибор может быть включен последовательно с усилителем или в цепь обратной связи. Увеличение чувствительности за счет усилителя позволяет уменьшить чувствительность электромеханического преобразователя, увеличив удельный противодействующий момент W или уменьшив момент инерции J за счёт уменьшения размеров или числа витков подвижной части. При этом, как сле-

дует из (7.117), расширяется полоса пропускания прибора

Следует отметить, что приборы с уравниванием механических активных величин, отличительной особенностью которых является наличие элемента сравнения с подвижной частью, обладая достаточно высокой точностью (класс точности может быть $0,05$ и даже лучше) в статике, имеют динамические характеристики, зачастую не удовлетворяющие пользователя, например, в авиационной технике, где многие измеряемые величины изменяются с высокой скоростью.

7.7.4. Измерительные приборы с уравниванием электрических величин

Измерительные приборы с уравниванием электрических величин – наиболее распространенная группа приборов. Их можно классифицировать по различным признакам, наиболее существенными из которых являются следующие: уравниваемая физическая величина – напряжение или ток; постоянный или переменный ток (напряжение); принцип действия элементов сравнения; принцип формирования уравнивающей величины (непрерывный, дискретный); алгоритм формирования сравниваемых величин и другие.

Отличительной особенностью приборов рассматриваемого класса является наличие элемента сравнения, реагирующего на напряжение или ток. В приборах, основанных на нулевом методе измерений, применяют магнито-электрические гальванометры, вибрационные гальванометры, усилители с электродвигателями, ферродинамические гальванометры, а в цифровых приборах – компараторы, управляющие счётчиками электрических импульсов или интеграторами. Основной задачей элемента их сравнения является: обнаружить состояние равновесия в контурах уравнивания напряжений или в узлах сравнения токов и выдать соответствующий сигнал оператору или в схему управления. В этом случае от них требуется лишь высокая чувствительность, малые аддитивные погрешности (смещение и дрейф нулевого

уровня), достаточное для целей измерения быстроедействие. Поскольку на вход (входы) элемента сравнения поступает в момент равновесия величина, равная нулю, то не приходится говорить об относительных и приведенных погрешностях. Класс точности для них не устанавливается. Они могут иметь неградуированную шкалу, что отличает их от измерительных приборов. Такие устройства называют индикаторами.

При дифференциальном методе измерений напряжения или тока в контурах или узлах уравниваются частично, а неуравновешенная часть измеряется при помощи электромеханических или каких-либо других приборов, метрологические характеристики которых должны быть известны.

Среди измерительных приборов с уравниванием электрических величин широкое распространение получили компенсаторы постоянного напряжения и тока, компенсаторы переменного напряжения, измерительные мосты постоянного и переменного тока, цифровые приборы для измерения непрерывных величин – напряжений, токов и других, преобразуемых в напряжение или ток.

7.7.5. Компенсаторы постоянного напряжения

Компенсаторы постоянного напряжения содержат контур уравнивания напряжений, состоящий из измеряемого напряжения U_x , или ЭДС E_x , и уравнивающего (компенсирующего) напряжения U_k , включенных встречно. Разность указанных напряжений воздействует на элемент сравнения – индикатор равновесия. Простейшая схема компенсатора представлена на рис. 7.22.

Преобразователь, формирующий компенсирующее напряжение, содержит меру ЭДС E_n , меру сопротивления R_n , преобразователь рабочего тока I_p в компенсирующее напряжение, вспомогательный источник питания и реостат установки рабочего тока.

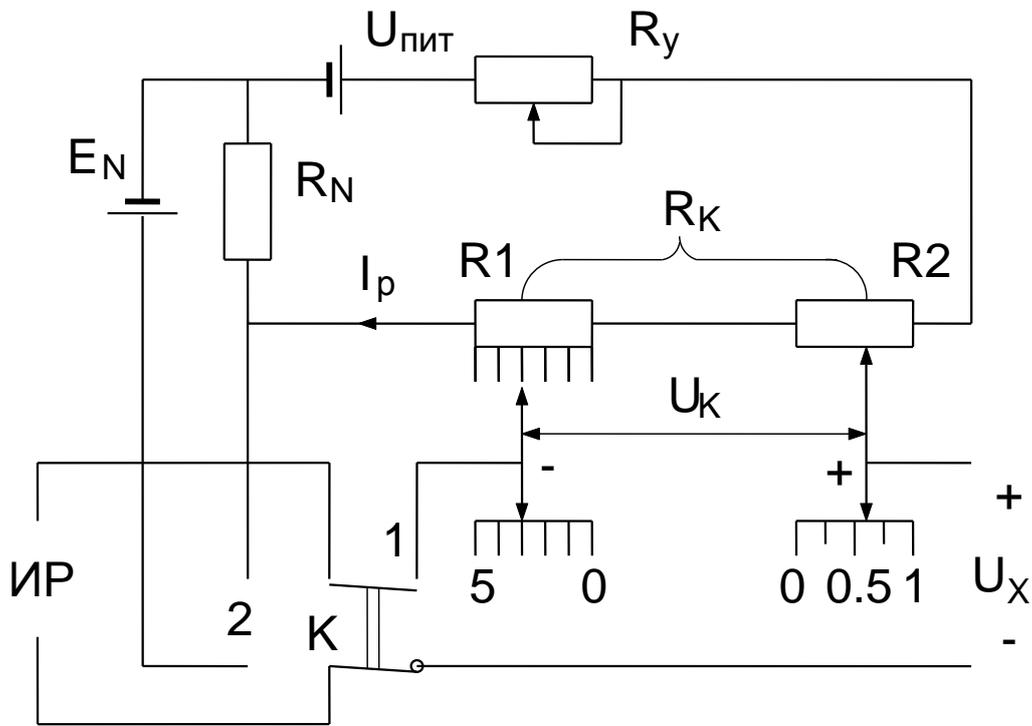


Рис. 7.22. Схема компенсатора постоянного напряжения

Компенсирующее напряжение $U_k = R_k I_p$ устанавливают путем изменения сопротивления R_k в положении контактов ключа – 1. Предварительно устанавливают рабочий ток I_p . При положении контактов ключа – 2 образуется контур уравнивания напряжений $E_n = R_n I_p$, где состояние равновесия достигается изменением рабочего тока I_p , который зависит от напряжения вспомогательного источника питания U_e и сопротивления R_y . В результате измерения получим уравнение (7.143)

$$U_x = U_k = \frac{E_n}{R_n} R_k, \quad (7.143)$$

из которого видно, что измеряемое напряжение равно произведению постоянного коэффициента $\frac{E_n}{R_n}$ – на сопротивление R_k . Значения E_n и R_n воспроизводятся постоянными мерами напряжения и сопротивления соответственно, следовательно, могут иметь высокую точность (до 0,001 %). Сложнее изготовить высокоточные преобразователи напряжение–ток–напряжение $R_1 - R_2$. Это, как правило, делители напряжения, к кото-

рым, кроме высокой точности преобразования, предъявляется такое требование, как постоянство сопротивления со стороны входных зажимов, обеспечивающее неизменность рабочего тока при измерениях. В компенсаторах невысокой точности применяют реостатные делители напряжения, а в компенсаторах высокой точности – декадные. В настоящее время декадные компенсаторы являются наиболее точными из приборов, предназначенных для измерения напряжений. Важным свойством компенсаторов напряжения является отсутствие тока в цепи измеряемого напряжения в момент равновесия, что позволяет измерять ЭДС источников с большим внутренним сопротивлением. Применяя дополнительные ИП, преобразующие измеряемые величины в напряжение или ЭДС, компенсаторами напряжения можно измерять ток, сопротивление, температуру, деформацию, скорость полета самолета и многое другое.

Большинство компенсаторов постоянного напряжения не содержит в конструкции нормальный элемент. Имеются лишь зажимы для его подключения при поверках. В этом случае предъявляются высокие требования к стабильности напряжения U_B вспомогательного источника.

Индикаторами равновесия в компенсаторах с ручным уравниванием служат магнитоэлектрические гальванометры, которые в ряде случаев для увеличения чувствительности и улучшения динамических характеристик снабжаются усилителями. Быстродействие таких компенсаторов мало, кроме того, с ними утомительно работать. Поэтому они нашли распространение лишь при высокоточных измерениях и при поверке.

В авиационной технике широко применяются самоуравнивающиеся компенсаторы. По принципу уравнивания они могут быть разделены на компенсаторы со следящим уравниванием и с циклическим уравниванием. У первых при изменении измеряемого напряжения u_x происходит изменение компенсирующего напряжения, зависящее от разности $\Delta u = u_x - u_k$ и направленное таким образом, чтобы уменьшить эту разность до нуля. Они выполняются в виде непрерывных следящих систем автоматического

управления, в которых индикатором равновесия служит усилитель, нагруженный на реверсивный двигатель, ротор которого механически соединен с движками резисторов R_1 и R_2 (рис. 7.22).

В компенсаторах с циклическим уравниванием компенсирующее напряжение U_k , независимо от E_x , изменяется, например, от нуля до U_{kmax} (или наоборот), и регистрируется то его значение, при котором имело место равновесие, т.е. $U_k = U_x$. Как правило, в приборах с циклическим уравниванием элемент сравнения выполняется в виде электронного усилителя (компаратора), который управляет работой счётчика электрических импульсов. Компенсирующее напряжение формируется цифро-аналоговым преобразователем, управляемым счётчиком импульсов. Приборы с циклическим уравниванием выполняются с цифровым отсчётом показаний. Все элементы его могут быть выполнены на базе современной электроники, что позволяет получить очень высокое быстродействие приборов.

7.7.6. Компенсаторы переменного напряжения

Принцип уравнивания напряжений может быть применен и на переменном токе. При этом для осуществления компенсации измеряемого напряжения \dot{U}_x компенсирующим напряжением \dot{U}_k необходимо, чтобы их мгновенные значения были равны в любой момент времени, что возможно при условии, если \dot{U}_x и \dot{U}_k одной и той же частоты и формы. Обычно форма \dot{U}_k - синусоидальная, а \dot{U}_x может быть любая, так что полной компенсации в общем случае осуществить нельзя. Поэтому уравнивают лишь основную (первую) гармонику \dot{U}_x .

В качестве указателя равновесия используется прибор, обладающий избирательными (селективными) свойствами, например, вибрационный гальванометр или усилитель с резонансным фильтром и электромеханическим прибором.

Регулируемое по фазе и амплитуде компенсирующее напряжение можно получить двумя способами: с помощью фазорегулятора и делителя напряжения и как геометрическую сумму двух регулируемых по амплитуде напряжений U_a и U_j , сдвинутых одно относительно другого на постоянный угол, равный 90° . В соответствии с этим имеются две разновидности компенсаторов переменного тока – полярно-координатные и прямоугольно-координатные.

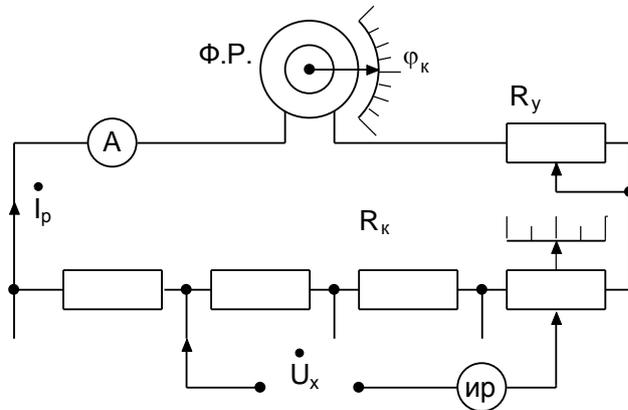


Рис. 7.23. Принципиальная схема полярно-координатного компенсатора

Принципиальная схема полярно-координатного компенсатора приведена на рис. 7.23.

Компенсирующее напряжение определяется как

$$\dot{U}_k = R_k \dot{I}_p.$$

Модуль рабочего тока контролируется амперметром A и устанавливается реостатом R_y . Применение амперметра для

контроля рабочего тока вызвано тем, что отсутствуют меры переменных токов и напряжений, аналогичные нормальным элементам постоянного напряжения.

Следовательно, погрешность измерения модуля U_x будет определяться погрешностью амперметра A . Регулируя значение U_k перемещением движков делителя и изменяя фазу φ_k поворотом ротора фазорегулятора, добиваются отсутствия отклонения указателя равновесия и по положению движков делителя и ротора фазорегулятора отсчитывают $U_k = U_x$, $\phi_x = \phi_k$.

На рис. 7.24 показана принципиальная схема прямоугольно-координатного компенсатора. Он имеет два делителя напряжения, средние точки которых соединены проводником. Делитель R_1 питается рабочим током $I_{p\alpha}$, устанавливаемым по амперметру. В цепь тока $I_{p\alpha}$ включена первичная катушка взаимной индуктивности M , предназначенной для питания де-

лителя R_2 током i_{pj} , который равен

$$i_{pj} = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + R_f + j\omega L_2} \approx j \frac{\omega M \dot{I}_{p\alpha}}{R_2 + R_f},$$

где $\dot{E}_2 = j\omega M \dot{I}_{p\alpha}$ – ЭДС во вторичной обмотке; L_2 – индуктивность вторичной обмотки M , сопротивление которой $\omega L_2 \ll R_2 + R_f$; R_f – сопротивление, необходимое для поддержания определенного значения тока I_{pj} при изменении частоты.

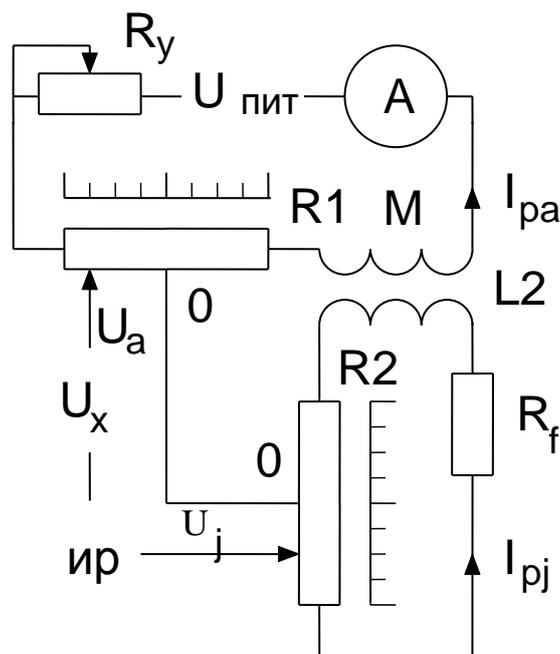


Рис. 7.24. Принципиальная схема прямоугольно-координатного компенсатора

Таким образом, ток I_{pj} сдвинут по фазе относительно тока $I_{p\alpha}$ на 90° , в результате и напряжения U_α и U_j сдвинуты на 90° .

Добившись равновесия перемещением движков реостатов, определяют $\dot{U}_x = \dot{U}_\alpha + \dot{U}_j$, откуда определяют его модуль и фазу

$$E_x = \sqrt{U_\alpha^2 + U_j^2}; \quad \varphi_x = \arctg \frac{U_j}{U_\alpha}.$$

Компенсаторы переменного тока применяют для измерения малых по

уровню напряжений, комплексных напряжений, а с дополнительными преобразователями измеряют токи и комплексные сопротивления. Очень удобны они при построении векторных диаграмм сложных электрических и магнитных цепей.

7.7.7. Измерительные мосты

Измерительные мосты предназначены для измерения параметров элементов электрических цепей: сопротивлений, индуктивностей, емкостей, т.е. пассивных электрических величин. Следовательно, необходима их активизация, в результате которой пассивную величину преобразуют в активную – напряжение u_x или ток I_x . При активизации к объекту измерения подводится энергия от дополнительного источника питания. Подобным же образом формируется и уравнивающая активная величина. В зависимости от вида активной величины образуют контур или узел уравнивания. В результате получают структурную схему, изображенную на рис. 7.25.

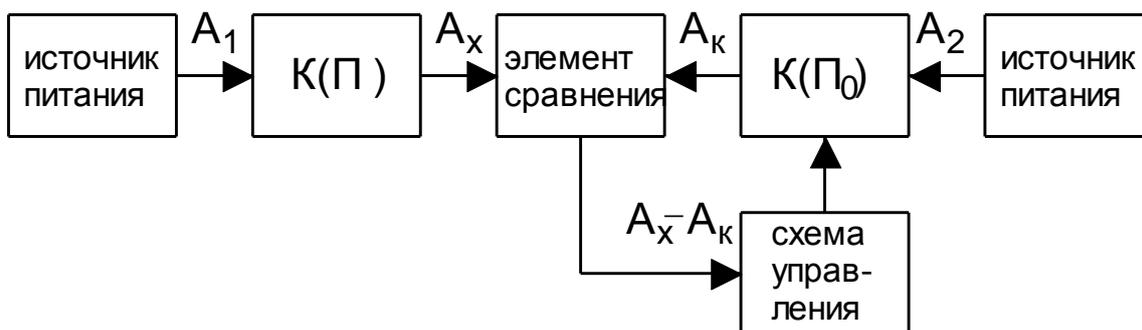


Рис. 7.25. Структурная схема измерительного моста

Источники питания, выдающие активные величины A_1 и A_2 в виде тока или напряжения, могут быть заменены одним источником, питающим оба преобразователя $K(\Pi_x)$ и $K(\Pi_0)$. Тогда A_1 и A_2 будут равны A . При равновесии схемы существует равенство $A_x = A_k$, следовательно, если преобразования линейные, получим

$$K(\Pi_x) = K(\Pi_0), \quad (7.144)$$

где $K(\Pi_x)$ – коэффициент преобразования преобразователя, формирующего A_x ; $K(\Pi_0)$ – коэффициент преобразования преобразователя, формирующего A_k .

Оба коэффициента преобразования являются функциями пассивных величин Π_x и Π_0 .

С практической точки зрения наиболее удобным оказывается питать преобразователи $K(\Pi_x)$ и $K(\Pi_0)$ от источника напряжения. Тогда получим две структурные формы: с контуром уравнивания напряжений и с узлом уравнивания токов, изображенные соответственно на рис. 7.26 и 7.27.

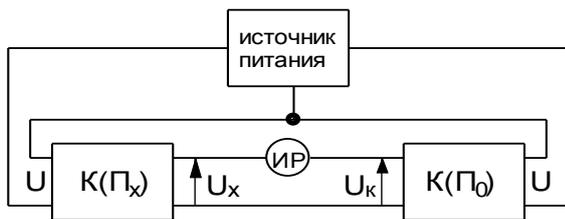


Рис. 7.26. Структурная форма питания преобразователя с контуром уравнивания напряжений

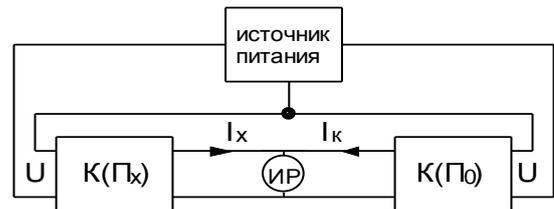


Рис. 7.27. Структурная форма питания преобразователя с узлом уравнивания токов

В первом случае преобразователи $K(\Pi_x)$ и $K(\Pi_0)$ преобразуют напряжение в напряжение. Это масштабные преобразователи, чаще всего делители напряжения, из которых, в свою очередь, наиболее распространены преобразователи, изображенные на рис 7.28.

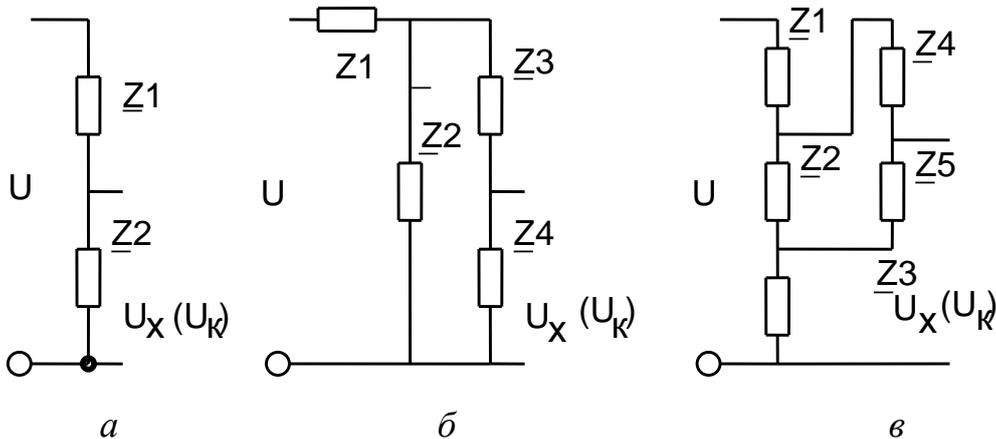


Рис. 7.28. Схемы наиболее распространенных масштабных преобразователей

Синтезируем измерительный мост на основе двух ИП, изображенных на рис. 7.28, *a*. В результате получим широко распространенный четырехплечий мост, схема которого приведена на рис. 7.29. Условие равновесия его определим, воспользовавшись уравнением (7.144). Сделав элементарные преобразования, получим

$$\dot{Z}_2 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_1 \dot{Z}_4, \quad (7.145)$$

где $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$ – комплексные сопротивления.

Пусть измеряется \dot{Z}_2 , тогда из уравнения

$$\dot{Z}_2 = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_4}{\dot{Z}_3} \quad (7.146)$$

видим, что в состояние равновесия мост может быть приведен изменением любого из сопротивлений $\dot{Z}_1, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$ или двумя из них, или всеми вместе.

Воспользовавшись показательной формой записи комплексных выражений $\dot{z} = ze^{j\phi}$, уравнение (7.145) можно записать в более удобном виде:

$$\begin{cases} Z_2 \cdot Z_3 = Z_1 \cdot Z_4 \\ \varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_4 \end{cases} \quad (7.147)$$

Уравновешивание мостов переменного тока осуществляют не только по модулю, но и по фазе.

Если мост работает на постоянном токе, то уравнение (7.148) примет вид

$$R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4, \quad (7.148)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивления постоянному току.

Так же как и компенсаторы, мосты могут быть автоматизированы.

Соединяя в различных сочетаниях преобразователи, изображенные на рис. 7.28, можно получить другие виды мостовых схем, например, двойные мосты постоянного тока для измерения малых сопротивлений (рис. 7.30) и

другие.

В измерительных мостах с узлом уравнивания токов $i_x - i_k = 0$ преобразователи $K(\Pi_x)$ и $K(\Pi_0)$ преобразуют напряжения в токи. Наиболее распространены два вида таких преобразователей, схемы которых изображены на рис. 7.31.

Соединяя указанные преобразователи таким образом, чтобы получить узел уравнивания токов, получим наиболее распространенные структуры T – и $2T$ – образных мостов, изображенных соответственно на рис. 7.32 и 7.33.

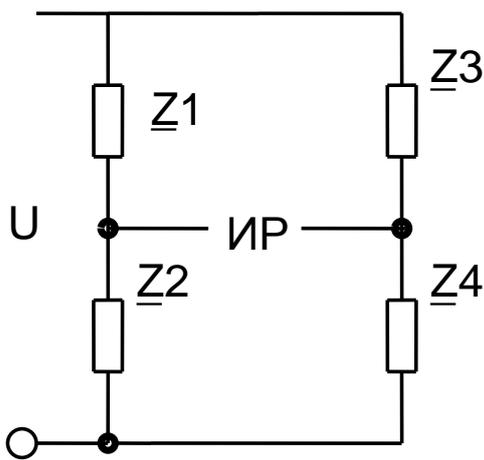


Рис. 7.29. Схема четырехплечевого моста

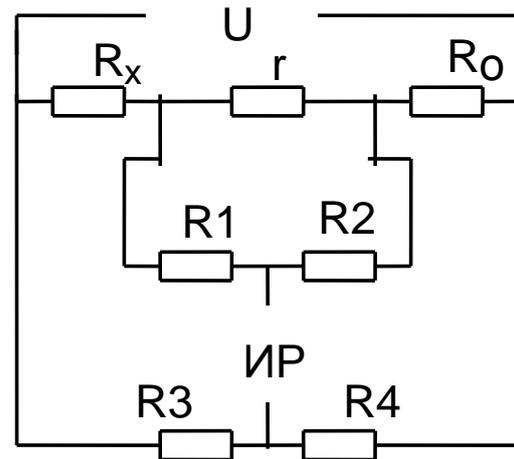


Рис. 7.30. Схема двойного моста постоянного тока для измерения малых сопротивлений

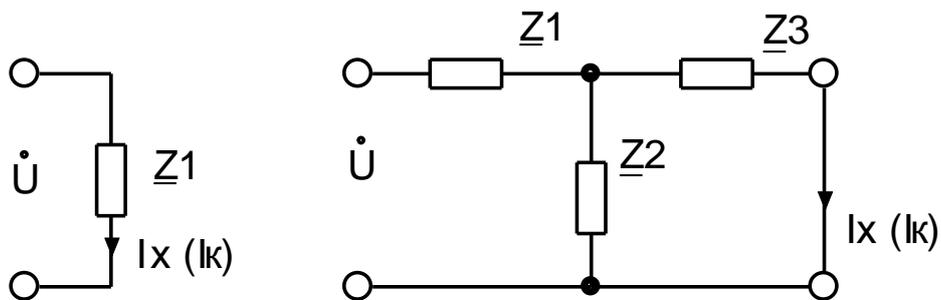


Рис. 7.31. Схемы измерительных мостов с узлами уравнивания токов

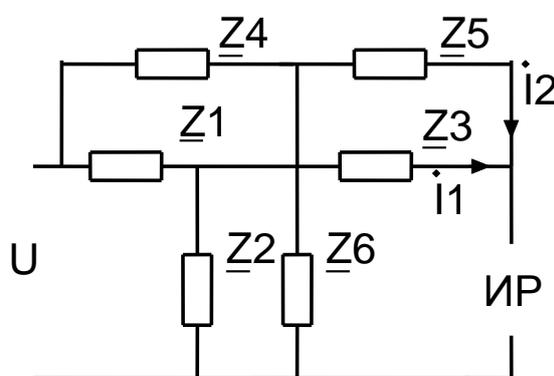
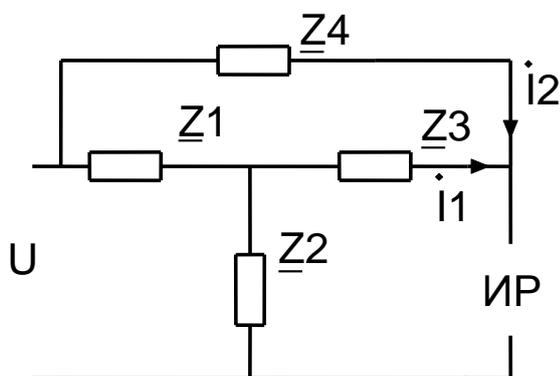


Рис. 7.32. Структура T – образного моста Рис. 7.33. Структура $2T$ – образного моста

Основным достоинством мостов с уравниванием токов является наличие общей точки у индикатора равновесия, источника питания и некоторых плеч. Заземление общей точки позволяет повысить помехозащищенность схем и применять их в широком диапазоне частот. Они применимы только для измерения комплексных сопротивлений.

Более подробные сведения о компенсаторах и мостах можно почерпнуть в [10].

7.7.8. Цифровые измерительные приборы

Основные требования, предъявляемые техникой и технологией к средствам измерений, это: высокая точность; быстродействие; возможность автоматизации процесса измерений; представление результатов измерений в форме, удобной для обработки, в том числе при помощи ЭВМ; малые габариты и вес; высокая надёжность.

Статическая точность рассмотренных выше приборов может быть достаточно высокой; так, у некоторых видов электромеханических приборов класс точности 0,05, а у компенсаторов и мостов – на порядок выше. Но при реализации такой точности габариты приборов становятся большими. Это связано с тем, что глаз человека может обнаружить перемещение стрелки прибора относительно шкалы в пределах 0,2 мм, а разрешающая способность для приборов класса точности 0,05 должна быть не менее 2000, следовательно-

но, длина шкалы должна быть не менее 400 мм.

Наличие подвижных частей не позволяет получить высокие динамические качества и надёжность.

Разрешить проблему сочетания точности и быстродействия позволили цифровые приборы. Отсутствие в приборах подвижных частей позволило резко увеличить их надёжность и долговечность. Представление измерительной информации в цифровой форме дает возможность обработки ее в ЭВМ. Сравнительно легко осуществляется автоматизация процесса измерений.

Рассмотрим некоторые основные положения цифровой измерительной техники.

Как уже отмечалось, под цифровым понимают такой измерительный прибор, который автоматически вырабатывает дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Под дискретным сигналом понимают сигнал, у которого информация заложена не в размере величины, используемой для передачи этой информации, а в соответствующем ей количестве сигналов, их взаимном расположении и т.д., причем дискретный сигнал в отличие от непрерывного может иметь только определенное конечное число значений. Систему правил, используемую для представления информации посредством цифр и дискретных сигналов, называют кодом.

Под непрерывной величиной $x(t)$ следует понимать величину, которая может иметь в заданном диапазоне бесконечно большое число значений в определенном интервале времени при бесконечно большом числе моментов времени.

Под аналоговой величиной понимают некоторую вторичную величину, все значения которой являются непрерывной функцией значений непрерывной, (исходной) величины.

Цифровой сигнал – это частный случай дискретного сигнала, когда соответствующая ему информация представлена в виде цифр.

На рис. 7.34 (а, б, в, г) представлены соответственно непрерывная вели-

чина, квантованная по времени (дискретизированная) и непрерывная по уровню величина, непрерывная по времени и квантованная по уровню величина, и квантованная как по времени, так и по уровню величина (цифровая).

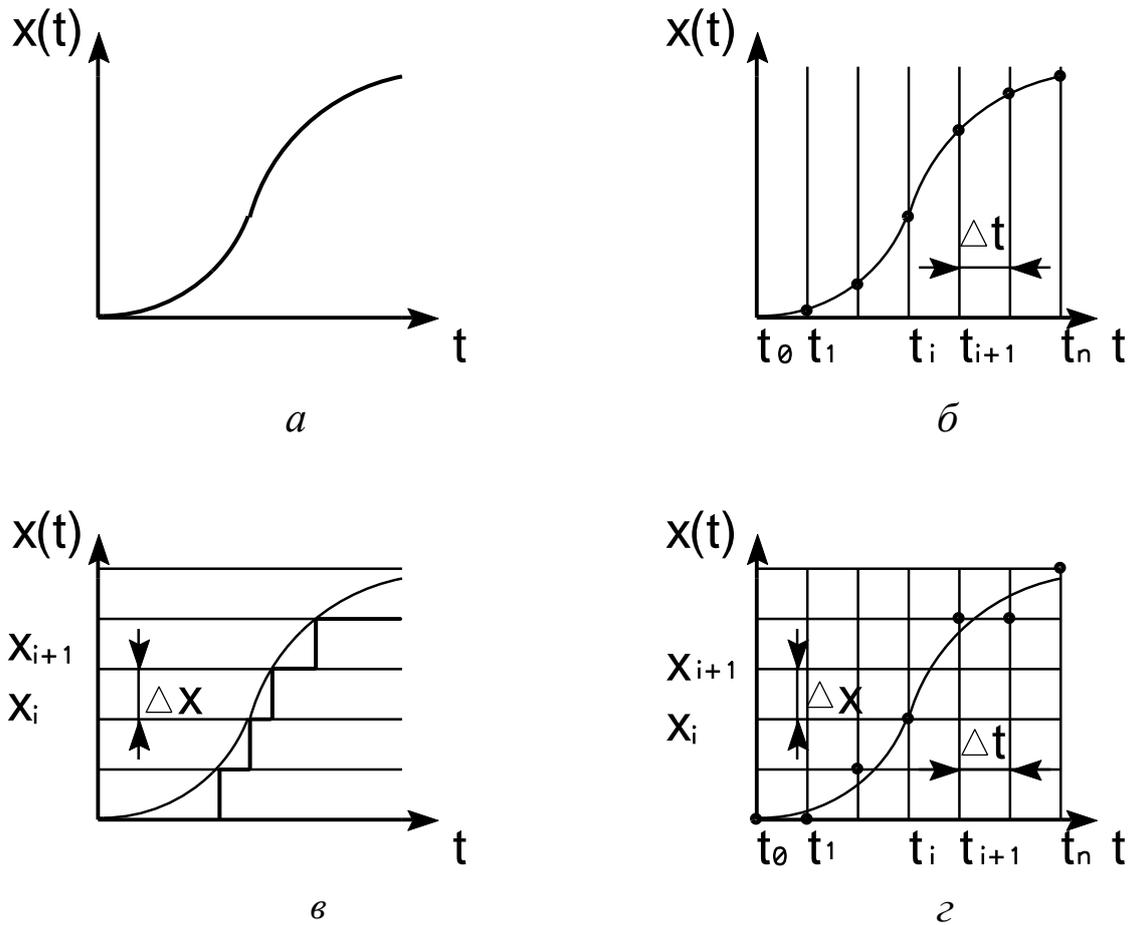


Рис. 7.34. Способы квантования непрерывных величин

Операцию перехода от непрерывной величины к квантованной называют квантованием по уровню. Величину $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ называют шагом квантования, величину $N = \frac{x_n}{\Delta x}$ — разрешающей способностью. X_n — диапазон изменения входной величины.

Возникающая при квантовании погрешность лежит в пределах $\pm \frac{\Delta x}{2}$ и носит случайный характер с равномерным симметричным распределением. Её среднее квадратическое значение

$$\sigma = \frac{\Delta x}{2\sqrt{3}}. \quad (7.149)$$

В процессе дискретизации (квантования по времени) возникают динамические погрешности

$$\Delta x_t = \frac{dx}{dt} \Delta t, \quad (7.150)$$

зависящие как от скорости изменения сигнала, так и от шага дискретизации.

В цифровых измерительных приборах происходит преобразование непрерывной физической величины в дискретную и квантованную величину с последующей индикацией на цифровом отсчетном устройстве.

Процесс аналого-цифрового преобразования состоит из многократного сравнения входного непрерывного сигнала с набором сигналов, воспроизводимых мерами или сформированных с помощью мер.

Применение практически безинерционных элементов сравнения, как правило, электронных компараторов, позволяет очень быстро (наносекунды) определить момент равенства неизвестной и сформированной величин, что приводит к большому разнообразию алгоритмов формирования уравнивающей величины.

Наибольшее распространение на практике получили три классических метода преобразования: последовательного счета, поразрядного уравнивания, считывания.

При методе последовательного счёта входная непрерывная величина уравнивается суммой одинаковых и минимальных приращений-квантов, находящихся в известном соотношении с воспроизводимой мерой величины. Результат преобразования характеризуется числом квантов, используемых при преобразовании. Число квантов представляется в виде последовательного единичного кода и с помощью счетчика преобразуется в позиционный код. Цифровые приборы, основанные на таком методе, применяются преимущественно для измерения интервалов времени, точнее, временных интервалов действия активных физических величин, частоты и других физических величин с промежуточным преобразованием их в интервал времени (или частоту). На рис. 7.35 показана схема такого устройства. Измеряемый

интервал времени T_x ограничивается моментами появления двух электрических импульсов – "начало" и "конец". По этим импульсам формирователь ФС вырабатывает строб-импульс длительностью T_x , который поступает на один из входов схемы совпадений И. На другой её вход подаются импульсы с частотой f_0 , вырабатываемые генератором опорных импульсов. Число импульсов, которое будет подсчитано счетчиком C_q и зафиксировано отсчётным устройством ОУ, будет равно

$$N = \frac{T_0}{T_x} = T_0 \cdot f_x. \quad (7.151)$$

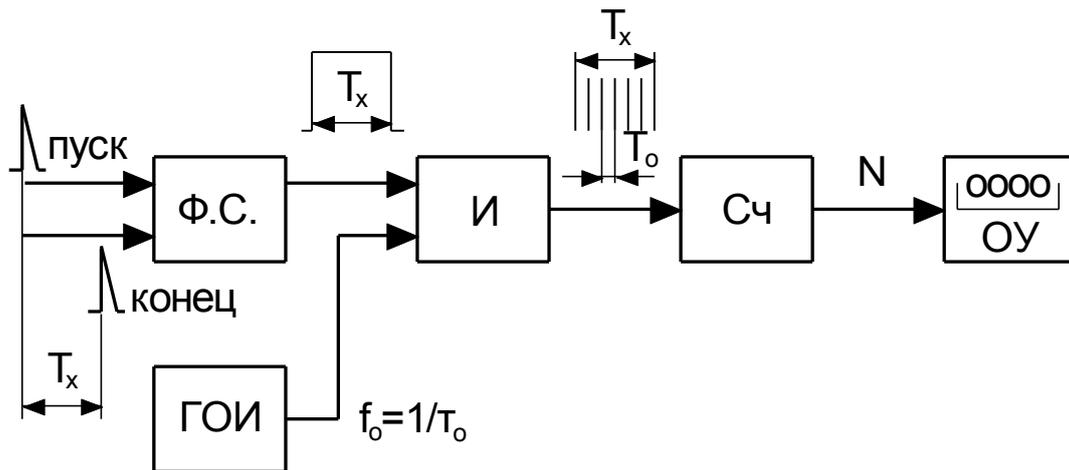


Рис. 7.35. Пример схемы цифрового прибора, построенного на квантовании времени считывания данных

Из (7.150) видно, что погрешность измерения T_x определяется погрешностью формирования опорной частоты f_0 . Применение в генераторах опорной частоты кварцевых резонаторов позволяет получить очень высокую стабильность частоты f_0 . Практически достижимые значения нестабильности частоты кварцевого резонатора $\frac{\Delta f}{f_0}$ лежат в пределах от 10^{-6} до 10^{-10} , следовательно, измерение временных интервалов возможно с такой же погрешностью.

Такие устройства очень широко применяются для измерения расстояний до объектов и высоты полета летательных аппаратов радиотехническими методами, при измерениях расхода топлива ультразвуковыми методами, при

измерении напряжений, токов, сопротивлений и других физических величин, преобразуемых во временные интервалы.

При методе поразрядного уравнивания входная величина сравнивается с другой однородной величиной, получаемой в результате суммирования различных по величине приращений. Сумма приращений компенсирующей величины (с погрешностью до наименьшего приращения) принимается за числовое значение измеряемой величины. Обычно набор приращений соответствует выбранному цифровому коду.

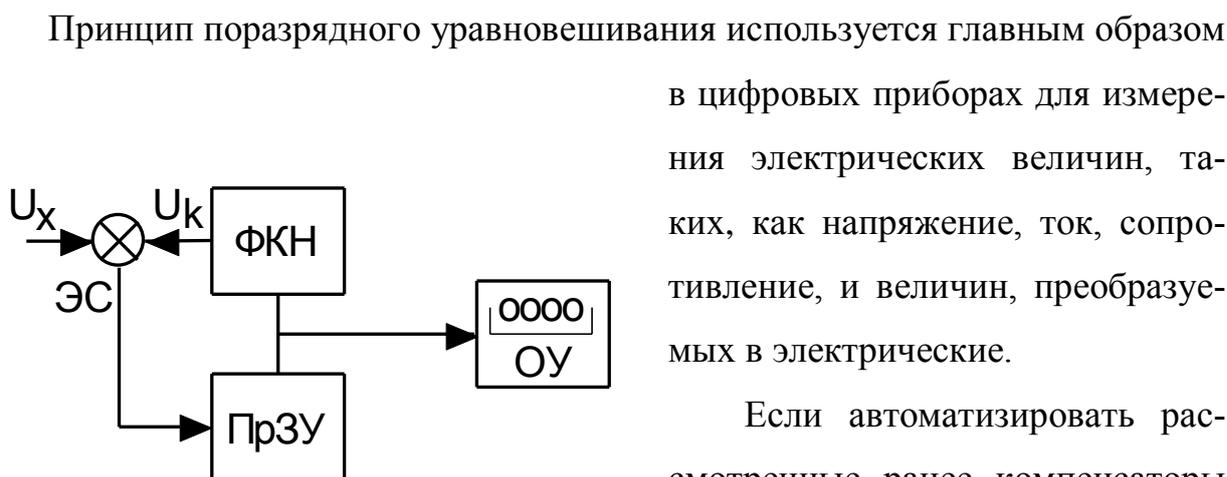


Рис. 7.36. Структурная схема цифрового вольтметра поразрядного уравнивания

в цифровых приборах для измерения электрических величин, таких, как напряжение, ток, сопротивление, и величин, преобразуемых в электрические.

Если автоматизировать рассмотренные ранее компенсаторы и измерительные мосты с дискретным уравниванием, то получим характерные примеры

приборов поразрядного уравнивания.

Структурная схема цифрового вольтметра поразрядного уравнивания показана на рис. 7.36.

Компенсирующее напряжение U_k формируется формирователем компенсирующего напряжения ФКН, управляемого программным запоминающим устройством ПрЗУ. Алгоритмы формирования U_k многочисленны и многообразны, а принцип уравнивания активных электрических величин сохраняется.

Метод считывания состоит в том, что в "памяти" кодирующего устройства цифрового прибора имеется набор всех возможных для данного прибора кодов и соответствующих им компенсирующих активных величин, каждая из

которых подается на вход одного из элементов сравнения. Число элементов сравнения равно числу компенсирующих величин. На вторые входы всех элементов сравнения подаётся измеряемая величина. Результат преобразования (измерения) фиксируется по числу сравнивающих устройств, отметивших равенство или превышение входной величины по отношению к каждому из компенсирующих. Непосредственным результатом преобразования является параллельный единичный код в виде сигналов на выходах сравнивающих устройств. На рис. 7.37 изображена схема цифрового вольтметра, основанного на принципе считывания.

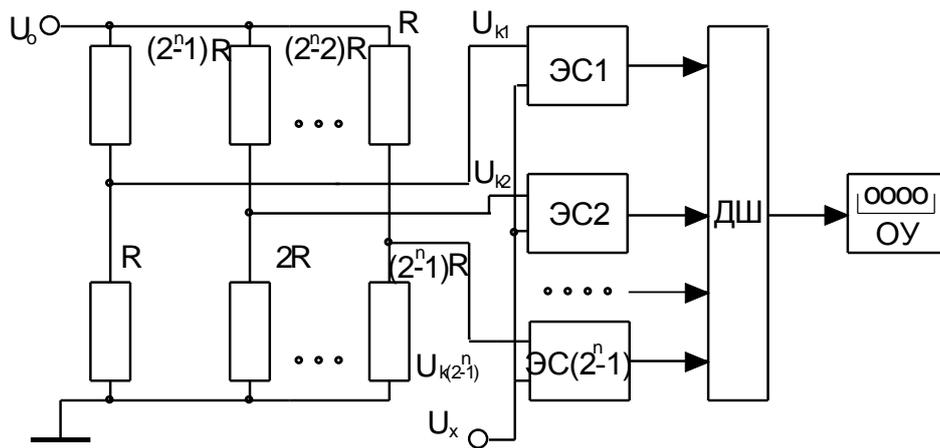


Рис. 7.37. Схема цифрового вольтметра, основанного на принципе считывания

Компенсирующие напряжения формируются делителями напряжения, на входы которых подано образцовое напряжение U_0 , формируемое при помощи мер напряжения. Сигналы с элементов сравнения расшифровываются дешифратором ДШ и подаются на отсчётное устройство.

Преобразователи считывания имеют широкое распространение из-за того, что они в принципе обладают самым высоким быстродействием из всех видов преобразователей напряжения в код. Недостатком их является большой объём оборудования, что приводит к снижению надёжности и увеличению стоимости. В связи с успехами интегральной технологии недостатки можно устранить и считать метод весьма перспективным.

Погрешности цифровых приборов определяются точностью и стабиль-

ностью мер и измерительных преобразователей, переходными сопротивлениями коммутирующих элементов, дрейфом нуля элементов сравнения и погрешностью квантования.

С целью улучшения метрологических характеристик и расширения возможностей цифровых измерительных приборов их снабжают встроенными микропроцессорными устройствами.

7.7.9. Применение микропроцессоров в измерительных приборах

Применение микропроцессоров и микроЭВМ в измерительных приборах явилось одним из важнейших этапов в развитии приборостроения.

Следует отметить, что микропроцессоры не являются измерительными устройствами. Они предназначены для выполнения вычислительных и логических операций с высокой скоростью и точностью. Совместная их работа с аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями в измерительной технике позволила резко повысить точность, надёжность и быстродействие приборов, расширить их возможности, создать программируемые, полностью автоматизированные устройства.

Применение микропроцессоров позволило прежде всего улучшить метрологические характеристики – точность, чувствительность, помехоустойчивость. Повышение точности было достигнуто за счет введения калибровочных операций, позволяющих минимизировать как аддитивную, так и мультипликативную погрешность. Для исключения аддитивной составляющей погрешности АЦП его входные клеммы замыкаются накоротко и заземляются. При этом число, полученное на выходе АЦП, характеризующее смещение, запоминается. При измерении оно вносится в результат как поправка.

Для исключения мультипликативной составляющей погрешности перед циклом измерения на вход АЦП подаётся воспроизводимая мерой величина A_0 . На выходе при номинальном значении чувствительности должно быть число B . Такое же число хранится в памяти микропроцессорной системы. При изменении чувствительности преобразователя на выходе АЦП получим

число $B' \neq B$. Отношение B/B' , вычисляемое микропроцессором, вводится как поправочный множитель.

Повышение пороговой чувствительности и помехоустойчивости приборов достигается обработкой сигнала по алгоритмам, приведённым в первой главе, или по другим алгоритмам, включающим операции вычисления оценки среднеквадратического отклонения результата измерения, решения вопроса, выполняется ли гипотеза о нормальном распределении вероятностей случайных погрешностей, а также операции вычисления доверительных границ случайных погрешностей.

Цифровая фильтрация сигналов позволяет повысить чувствительность и расширить диапазон измеряемых величин в сторону малых значений.

Рассмотренные приёмы позволяют полнее использовать метрологические свойства мер и приблизить погрешности измерительных приборов к погрешностям применяемых в них образцовых мер.

Важным направлением применения микропроцессоров в измерительной технике является возможность получения различных математических функций измеренных значений и решения систем уравнений, что позволяет сравнительно просто перейти от косвенных, совокупных или совместных измерений к прямым. Причём микропроцессорные вычислители могут осуществлять эти операции с высокой точностью, значительно превышающей точность аналоговых вычислительных устройств. Многие приборы, содержащие микропроцессоры, позволяют автоматически выполнять запрограммированные функциональные и логические преобразования, например:

1. Умножение найденного значения на константу.
2. Определение отклонения измеряемой величины от заданной в абсолютных единицах, относительных или в процентах.
3. Сложение или вычитание константы.
4. Вычисление отношений: деление на константу, нахождение частного от деления одного результата измерения на другой результат, деление константы на результат измерения.

5. Нахождение максимума и минимума из ряда измерений.

6. Определение выхода измеряемой величины за пределы уставки максимума и минимума. Представление результата измерения в логарифмических единицах.

8. Линеаризация зависимостей.

Применение микропроцессорной техники позволило создавать многофункциональные приборы, предназначенные для измерения нескольких параметров сигналов или характеристик объекта исследования. Функциональные возможности таких устройств определяются выполняемой программой, их можно легко видоизменить путем перехода к другой программе, хранимой в ПЗУ. Программируемая логика работы в отличие от жесткой создает гибкость перестройки, позволяет наращивать функции при модернизации прибора без существенных изменений в его схеме.

В результате сокращения числа компонентов в схеме прибора вследствие выполнения многих функций микропроцессорными системами уменьшились их габариты, вес, потребляемая мощность и стоимость. Существенно сократились сроки разработки измерительной аппаратуры.

Часто для получения новых свойств прибора не требуется значительных изменений в его схеме и тем более в конструкции. Разработка сводится к созданию необходимого программного обеспечения. Если учесть, что имеется библиотека совершенных типовых прикладных программ, то разработка программного обеспечения сводится к рациональному выбору имеющихся программ.

7.8. Конструкции и функциональные параметры контрольно-измерительных модулей

7.8.1. Конструкция базовой части КИМ и ее функциональные параметры

На базовой части КИМ непосредственно осуществляется процесс измерения, т. е. производится отсчет координат точек поверхности детали. В со-

став базовой части входит механическая часть КИМ, материализующая систему координат КИМ и включающая прецизионные узлы координатных перемещений, устройства для установки и крепления измеряемой детали, узлы виброизоляции, измерительную головку, электромеханические приводы, измерительные преобразователи линейных (круговых) перемещений, калибровочные элементы и т. д. Один из возможных вариантов базовой части КИМ приведен на рис. 7.38.

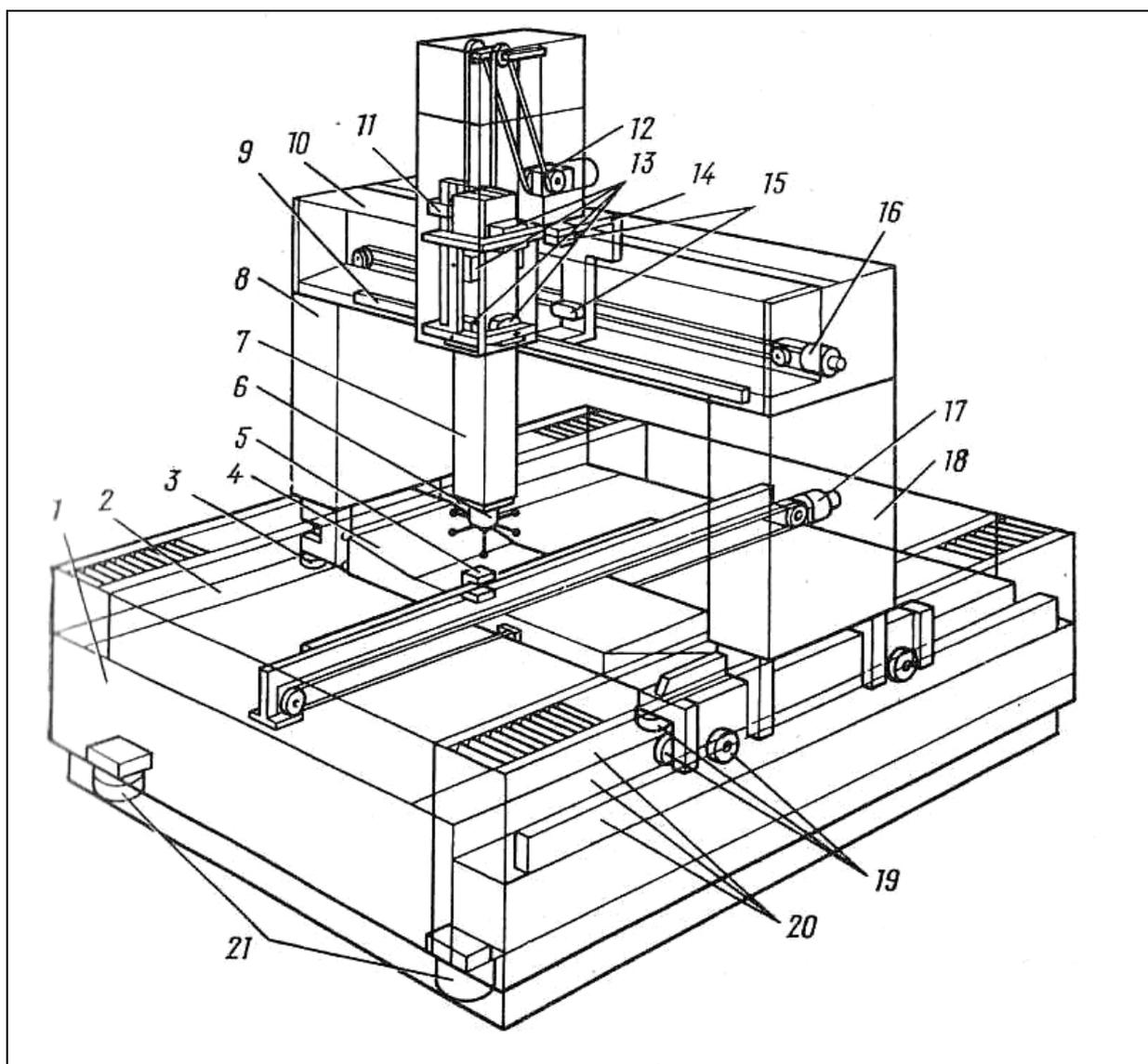


Рис. 7.38. Схема базовой части КИМ: 1 – основание; 2, 20 – направляющие основания; 3, 19 – подшипники портала; 4, 8, 10 – замыкающий мостик, стойки и балка портала; 5, 9, 11 – измерительные преобразователи портала, каретки, пиноли; 6 – ИГ; 7 – пиноль; 12, 16, 17 – приводы пиноли, каретки портала; 13, 15 – подшипники, пиноли и каретки; 14 – каретка; 21 – виброизолирующие опоры

Основными функциональными показателями базовой части КИМ являются точность и быстродействие при измерении координат точек детали. При этом речь идет не только о первоначальной точности, достигаемой при выпуске КИМ и оцененной на испытаниях в определенных, строго регламентированных условиях, но и о сохранении высокой точности в процессе эксплуатации, в том числе в производственных условиях, отличающихся от регламентированных. Высокое быстродействие обусловлено необходимостью достижения высокой производительности измерения отдельных параметров деталей, рассчитываемых по результатам измерения координат большого числа точек. Рассматриваемые функциональные параметры базовой части КИМ определяются ее компоновкой, конструкцией и точностью узлов и систем.

Компоновка в значительной степени определяет характеристики КИМ и требования к конструкции и параметрам основных узлов. В свою очередь компоновка зависит от габаритных размеров и массы измеряемых деталей; расположения измеряемых поверхностей; необходимого числа координатных перемещений для реализации оптимального в отношении точности и производительности процесса измерения; условий эксплуатации и взаимодействия КИМ с другим технологическим оборудованием.

Требования, предъявляемые к компоновке КИМ:

- минимальное отклонение от принципа Аббе;
- обеспечение оптимальных динамических свойств;
- минимизация деформаций узлов в КИМ, возникающих из-за действия переменной массы измеряемых деталей, ИГ, перемещения подвижных узлов;
- удобство и точность компенсации деформаций;
- наличие открытого измерительного пространства, обеспечивающего удобство установки детали и хорошую ее обзримость в процессе измерения.

В КИМ, как и в других приборах для пространственных измерений, не соблюдается одно из основных требований к прецизионным измерительным средствам – расположение измерительных преобразователей вдоль линий измерения (первый принцип Аббе), так как положение линии измерения (направление и расстояние от ИП) в рабочем пространстве КИМ постоянно меняется. Вследствие этого возникают погрешности измерения Δ , значение которых возрастает с увеличением углового непостоянства перемещающихся узлов КИМ и расстояния между линией измерения и ИП. Компонировка базовой части КИМ должна обеспечивать минимальное расстояние между ИП координатных перемещений и центром зоны наиболее вероятных измерений. Наиболее вероятно измерение детали с объемом, значительно меньшим объема, определяемого координатными перемещениями КИМ. Уменьшение объема возникает и при использовании ИГ с несколькими измерительными щупами, ориентированными в различных направлениях. Поэтому зона, в которой наиболее часто выполняются измерения, смещена ближе к столу для установки детали от центра рабочего пространства КИМ.

При отсчете координат точек в период разгона и торможения возникают угловые колебания подвижных узлов, являющиеся причиной погрешностей измерения из-за несоблюдения принципа Аббе.

Для уменьшения данных колебаний направление силового действия привода на подвижный узел должно проходить через его центр тяжести или быть минимально удалено от него.

Все компоновочные решения КИМ можно разделить на две группы: КИМ с неподвижной и КИМ с подвижной в процессе измерения деталью. Компонировки с неподвижной деталью более универсальны, однако создается сложность обеспечения высокой точности перемещения ИГ по трем осям. У КИМ с подвижной деталью проще обеспечивается точность перемещения ИГ, так как она перемещается только вдоль двух или одной оси.

Также сравнительно просто достичь высокой точности перемещения и измерения перемещения подвижного стола, который имеет плоскую конфи-

гурацию. Его ИП устанавливается близко к верхней рабочей плоскости и оси симметрии, а привод – вблизи центра тяжести стола. Однако на точность перемещения и точность измерения данного перемещения существенно влияют масса и конфигурация детали. С увеличением массы и размеров детали возрастают деформации подшипников, направляющих, ухудшаются динамические свойства, вследствие чего теряются точность и производительность измерений.

Другим важным показателем компоновок КИМ является направление перемещения узла, несущего ИГ. По этому признаку компоновки разделяют на вертикальные и горизонтальные, перемещение указанного узла которых происходит соответственно в вертикальном или горизонтальном направлениях.

КИМ вертикальной компоновки имеют большую жесткость, более высокую точность, менее чувствительны к изменению массы ИГ или других устройств. Они обеспечивают достаточно хороший доступ к измеряемым элементам, расположенным по всей поверхности детали. Как правило, несколько затруднен доступ к глубоким горизонтальным отверстиям. Для измерения таких отверстий требуются ИГ с длинными горизонтальными измерительными наконечниками или установка ИГ на горизонтальные удлинители. Измерительное пространство КИМ вертикальных компоновок ограничивается стойками и подвижными узлами с одной, двух или трех сторон.

Вертикальные компоновки по устройству базовых узлов можно разделить на четыре группы: порталные, мостовые, консольные, стоечные.

7.8.2. Портальные компоновки КИМ

Портальные компоновки наиболее распространены и представлены рядом различных вариантов. Характерной особенностью этих компоновок является П-образный портал (рис. 7.39).

По горизонтальной оси перемещается каретка, несущая подвижную

вдоль вертикальной оси пиноль, на которой крепится ИГ. По исполнению, характеристикам и назначению можно выделить две разновидности порталных компоновок:

- с порталом, подвижным по направляющим основания вдоль горизонтальной оси;
- с жестко установленным на основании порталом и подвижным по направляющим основаниям столом.

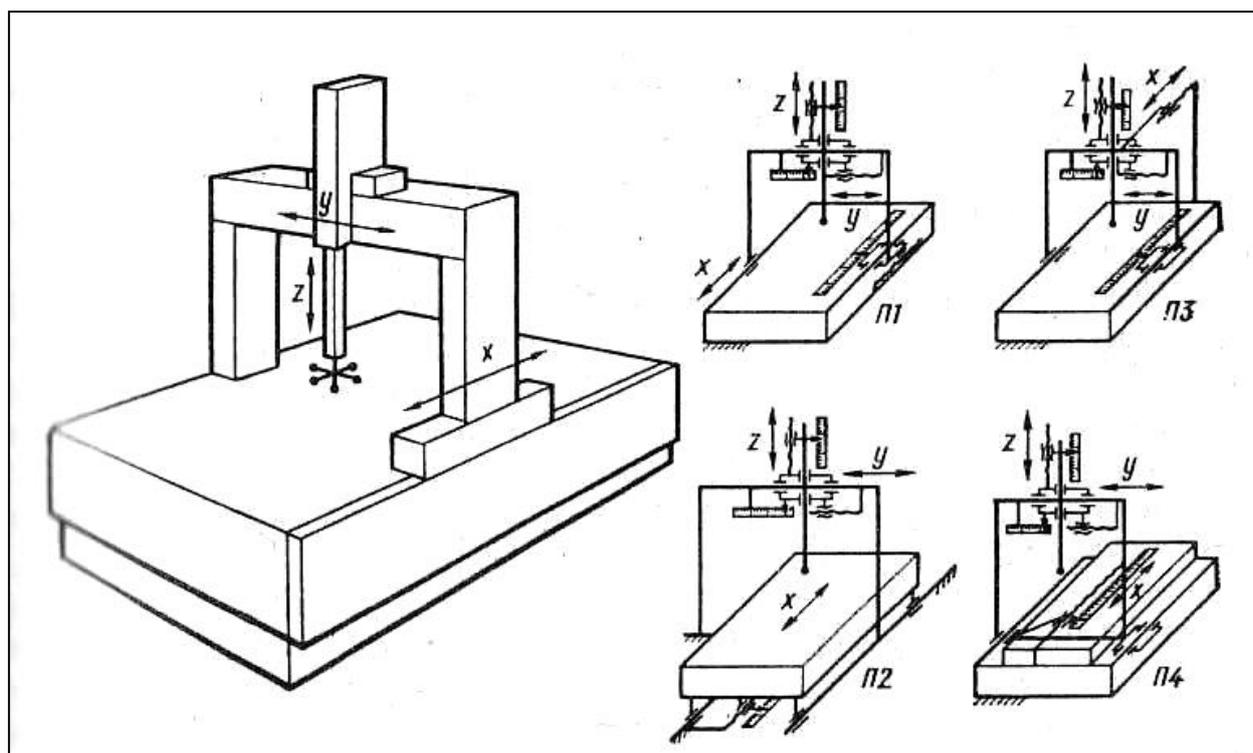


Рис. 7.39. Портальные компоновки КИМ

Портальные компоновки имеют высокую жесткость основных узлов, точность, хорошие динамические свойства, достаточно открытое пространство для установки детали и ее обзорности в процессе измерения.

Портальные компоновки с полным порталом П1 (рис. 7.39) рекомендуются для прецизионных среднегабаритных КИМ, с перемещением каретки вдоль портала до 1000 мм, пиноли до 800 мм и для средне – и крупногабаритных производственных КИМ с перемещением вдоль портала до 1600 мм, пиноли до – 1400 мм.

Портальная компоновка П2 с неподвижным порталом используется для прецизионных среднегабаритных КИМ с координатными перемещениями до 1200 мм.

Точность и особенно быстродействие повышают, используя портальную компоновку П3, в которой привод портала установлен на специальной стойке, расположенной у заднего края основания КИМ. Усилие привода действует вблизи центра тяжести портала. Это уменьшает угловые колебания и время их гашения при торможении портала. Однако такая модификация портальной компоновки применима при сравнительно небольших перемещениях портала. Кроме того, наличие стоек крепления привода и самого привода, расположенного над измеряемой деталью, ухудшает обзорность последней в процессе измерения. Такие компоновки используются для прецизионных КИМ с перемещениями портала до 1200 мм.

Лучшее соблюдение принципа Аббе по сравнению с рассмотренными компоновками с подвижным П – образным порталом обеспечивается у КИМ компоновки П4 (рис. 7.38, 7.39) с замкнутым контуром портала, образованным жестко соединенными балкой, двумя стойками и замыкающим мостиком. ИП измерительной системы перемещения портала установлен посередине основания машины под специальным накладным столом в непосредственной близости к центру пространства наиболее вероятных измерений. Привод портала, расположенный там же, совпадает с проекцией центра тяжести портала. Накладной стол, воспринимающий нагрузку детали, не связан жестко с основанием и опирается на него в точках установки основания на фундаменте. Таким образом, уменьшаются деформации направляющих основания при изменении массы деталей, что очень важно для прецизионных КИМ. Снижаются и деформации портала, имеющего замкнутый контур, при перемещении вдоль него каретки.

Для КИМ портальной компоновки с подвижным порталом сложно увеличить диапазон перемещения по вертикальной оси. Это является недостатком данной компоновки. При увеличении высоты стоек портала уменьшается

его жесткость и увеличивается амплитуда угловых колебаний под действием сил инерции из-за деформаций самого портала, стоек, подшипников его перемещения и узлов их установки. Повышение жесткости за счет увеличения размеров упомянутых элементов приводит к повышению массы и снижению быстродействия машины. Поэтому такое решение неэффективно.

В целях решения данной проблемы для среднегабаритных КИМ с увеличенным перемещением по вертикальной оси используются компоновки с подвижным полупорталом.

Повышенной жесткостью и стабильностью несущего подвижного звена при сравнительно небольшой его массе обладают КИМ с подвижным Г – образным полупорталом (П5), образованным из жесткой горизонтальной поперечины и легкой опоры (рис. 7.40). Полупортал одним концом поперечины базируется на поднятой и жестко прикрепленной относительно основания балке с направляющими, а свободным концом посредством подшипников опирается на направляющие основания. Привод и ИП полупортала прикреплены к балке.

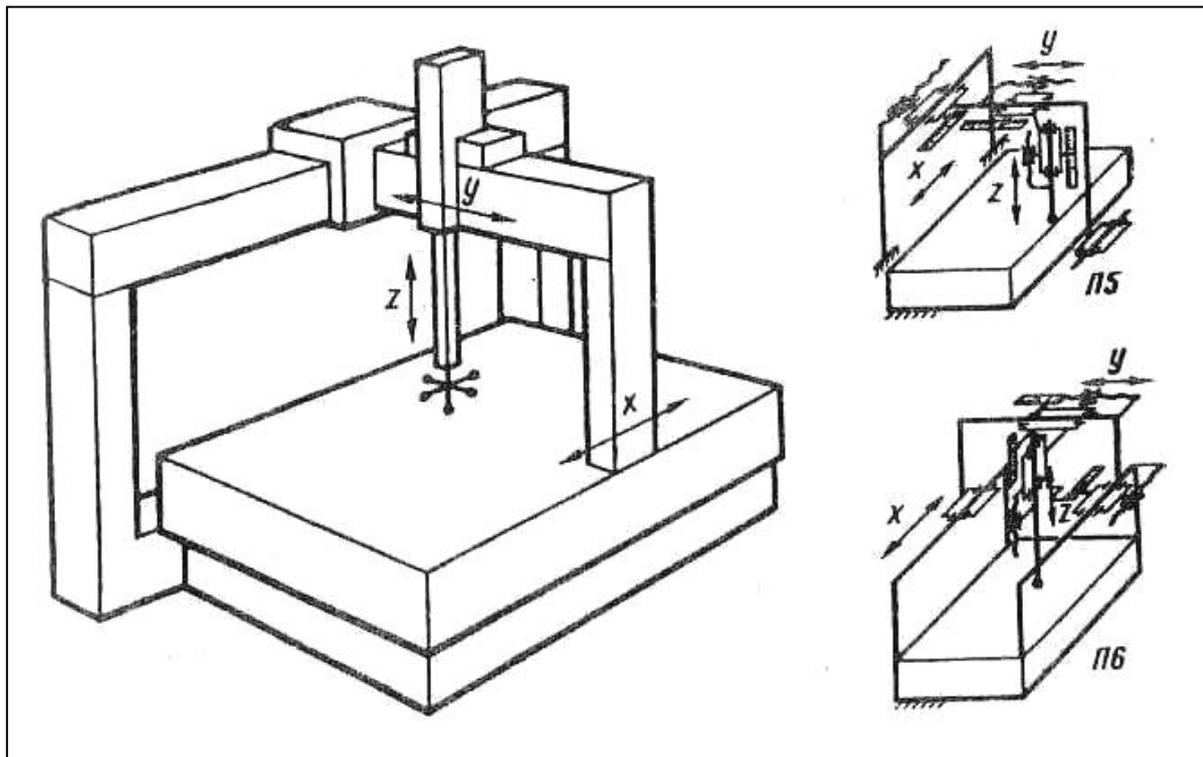


Рис. 7.40. Портальные компоновки с полупорталами

Такая компоновка обеспечивает свободный доступ с двух сторон конструкции для установки детали и достаточную обзорность при осуществлении измерений и рекомендуется для прецизионных КИМ средних габаритов с увеличенным перемещением по вертикальной оси, для которых измерительное пространство близко к кубу. Компоновка применяется также и для крупногабаритных КИМ.

Для мало- и среднегабаритных КИМ используется также компоновка с укороченными стойками портала П6 (рис. 7.40). Портал перемещается по установленным на боковых стойках балкам, поднятым над основанием. На одной из них установлен ИП измерительной системы и привод портала. Укороченные стойки портала, имеющие меньшую массу и большую жесткость, являются достоинством базовой части КИМ, но боковыми стойками и горизонтальными балками ограничивается доступ к измерительному пространству и создаются определенные неудобства для установки детали и ее измерения, особенно при небольшом измерительном пространстве.

7.8.3. Примеры современных КИМ портального типа

Одну из самых широких номенклатур универсальных КИМ на мировом рынке предлагает фирма DEA (Brown&Sharpe). Программа их выпуска охватывает все типы машин, начиная с малогабаритных ручных портальных и заканчивая крупногабаритными машинами, диапазон перемещения по осям которых превышает 10 м.

Особенностями данных машин являются:

- высокоскоростное и высокоточное проведение размерного контроля и сканирования деталей любой сложности;
- подвижные части КИМ выполнены из легких алюминиевых сплавов, а направляющие оси X и опорные стойки – из стали;
- направляющие КИМ помещены в специальный кожух, внутри которого осуществляется принудительная циркуляция воздуха, что позволяет из-

бежать влияния температурных колебаний окружающей среды;

- несущая траверса каретки КИМ выполнена по запатентованной технологии «наклонного портала», что позволяет снизить центр тяжести подвижных частей при сохранении максимальной жесткости конструкции;
- перемещение подвижных частей производится на аэростатических опорах (пневмоподшипниках), что обеспечивает легкость перемещения КИМ и полностью исключает механический износ направляющих;
- двигатели привода КИМ вынесены за пределы базовой металлоконструкции, за счет этого тепло, выделяемое при работе двигателей, не оказывает влияния на точностные характеристики КИМ;
- привод от двигателя осуществляется через зубчатременную передачу металлоармированным ремнем с эллиптическим профилем зуба. Такая передача сводит к минимуму вибрации при высоких скоростях измерения;
- математическая компенсация геометрических погрешностей машины;
- машины оснащаются высококачественными измерительными системами и комплектующими компании Renishaw – лидирующего мирового производителя в данной области.

Машины портального типа получили наиболее широкое распространение на производстве. Управление машиной в зависимости от модели – ручное, с программированием и обработкой результатов посредством встроенного микроконтроллера или от ЧПУ – с программированием на ЭВМ, с использованием специального программного обеспечения.

Машины данного типа имеют высокую жесткость основных узлов, точностью, хорошие динамические свойства, достаточно открытое пространство для установки детали и ее обзорность в процессе измерения.

Диапазон размеров рабочей зоны машин данного типа ($X \times Y \times Z$, мм) – от $457 \times 508 \times 406$ до $1200 \times 3000 \times 1000$.

Данный тип машин представлен следующими моделями:

- Серия машин Global (DEA, Brown&Sharpe);

- Global Image;
- Global Status;
- Global Reference;
- Global SP80;
- DCC Gage (DEA, Brown&Sharpe);
- Gage 2000 R и Gage 2000 P (DEA, Brown&Sharpe);
- Etalon Derby 454 (TESA, Brown&Sharpe);
- Серия машин Ghibly (DEA, Brown&Sharpe) и др.

Координатно-измерительные машины GLOBAL – современная серия машин DEA портального типа. Большие функциональные возможности обеспечивают выполнение широкого спектра измерительных и инспекционных задач.

Рентабельность применения, производительность, точность, надежность, гибкость и ультрасовременный дизайн – вот качества, характеризующие машины данной серии, разработанные по передовым инновационным технологиям.

Прочная алюминиевая конструкция (патент TricisionTM и Slant BridgeTM), измерительные шкалы Autodur[®] высочайшего разрешения и система термокомпенсации позволяют производить высокоточные измерения в любых производственных условиях.

GLOBAL IMAGE. Является многоцелевой гибкой координатно – измерительной системой, способной быстро и эффективно выполнять любые виды объемных обмеров (рис. 7.41).

Технология, основанная на многосенсорных датчиках, оснащенная автоматическим магазином смены инструмента и ориентируемой головкой, позволяет использовать GLOBAL IMAGE как наиболее удобный



Рис. 7.41. КИМ серии Global Image

инструмент для выполнения многочисленных метрологических функций, объединенных в единую быструю и точную координатно-измерительную систему.

Система позволяет использовать как контактные электронные датчики, так и бесконтактные лазерные измерительные головки, позволяющие производить непрерывное сканирование поверхностей с самым сложным профилем.

Хорошая стойкость к температурным изменениям обеспечивается автоматической линейной системой тепловой компенсации, входящей в стандартную комплектацию данной модели.

Для работы в особо тяжелых условиях предоставляется возможность оснащения машины системой тепловой компенсации A.C.T.I.V[®]. Измерительные системы GLOBAL IMAGE могут комплектоваться специальными панелями, защищающими машину от загрязнения в открытых цеховых условиях эксплуатации.

GLOBAL STATUS. Оптимальные размеры рабочей зоны, высокая точность, широкий спектр применяемых конфигураций щупов и диапазон измерения по осям X,Y – до 900×800 мм – делают данную модель КИМ идеальной измерительной системой для измерения призматических деталей со сложным профилем малых и средних размеров (рис. 7.42).

GLOBAL SP80. КИМ GLOBAL SP80, оснащенная высокоточной сканирующей головкой SP80, является идеальным решением для таких технологических задач, как инспектирование прецизионных элементов, где необходимо определять отклонения формы и профиля с высокой точностью (рис. 7.43).



Рис. 7.42. КИМ серии

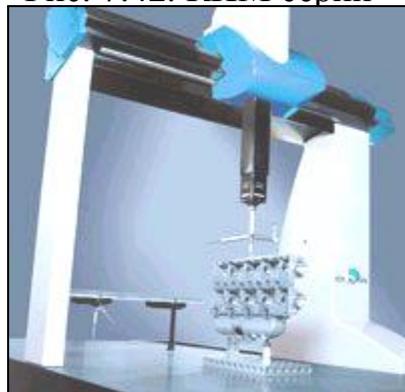


Рис. 7.43. КИМ серии
Global SP80

Благодаря особенностям конструкции, сенсор SP80 производит точечный обмер поверхности, с определением вектора ее направления, стремясь максимально скомпенсировать радиус щупа, используемого для измерений. Кроме того, SP80 позволяет использовать специальные конфигурации щупов, которые могут быть помещены в магазин автоматической смены инструмента на КИМ и автоматически использоваться в цикле работы.

ETALON DERBY 454 – идеальное решение для проверки и измерения наладочных параметров станков на производственном участке, отдельных частей, образцов и их партий (рис. 7.44). Данная модель выпускается уже около 10 лет и благодаря своей невысокой стоимости (около 220000 грн), по сравнению с другими КИМ данного типа (800 – 1500 тыс. грн), является самым распространенным капиталовложением предприятий. Машины этой модели распространены на ряде предприятий Украины. Derby успешно применяется на заводе «ФЭД» (Харьков) и в настоящее время работает со 100 % – й загрузкой.



Рис. 7.44. КИМ модели Etalon Derby 454

Основные функции и технические характеристики:

- перемещение по осям, мм ($X \times Y \times Z$): $457 \times 508 \times 406$;
- дискретность цифровой шкалы: 0,001 мм / 0,00001 дюйма;
- точность по ISO 10360 – 2, мкм:

$$E = 4,0 + 5,0L / 1000,$$

где E – максимально допустимая пространственная погрешность измерения,

L – измеряемая длина в миллиметрах;

- указанная точность измерения гарантируется при следующих температурных колебаниях:

- общие колебания $T = 20 \pm 1$ °C,

- пространственные изменения в рабочем объеме машины 1° ,
- скорость изменения $0,5^\circ / \text{час}$, $1^\circ / 24 \text{ часа}$;
- допустимый уровень вибраций, при котором гарантируется указанная точность: для частоты вибрации: от 1 до 10 Гц допустимый уровень виброускорений составляет $20 \text{ мм} / \text{с}^2$, от 14 до 35 Гц – $40 \text{ мм} / \text{с}^2$, свыше 102 Гц – $500 \text{ мм} / \text{с}^2$;
- разрешающая способность измерительной системы: $0,0001 \text{ мм}$;
- повторяемость: 4 мкм ;
- наибольшая скорость перемещения: $760 \text{ мм} / \text{с}$;
- простота обучения и использования;
- графическое представление геометрических элементов, подсказок программного обеспечения, функций измерения и выходных постоянных результатов;
- автоматическое определение геометрических форм измеряемых поверхностей;
- оцифровка геометрии обрабатываемой детали для приложений CAD;
- не требуется проведение длительных процедур программирования оборудования и юстировки исследуемых деталей;
- панель управления: дисплей $89 \times 118 \text{ мм}$ с подсветкой;
- компьютерный интерфейс RS-232C;
- максимальные габаритные размеры измеряемой детали: ось X – 559 мм , ось Y – 750 мм , ось Z – 483 мм ;
- максимальный вес измеряемой детали: 227 кг ;
- питание: $115 \dots 220 \text{ В}$, $50 \dots 60 \text{ Гц}$;
- рабочий диапазон температур: $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Рис. 7.45. Измерительные системы Renishaw, применяемые в базовой комплектации КИМ Etalon Derby 454

7.8.4. Мостовые компоновки КИМ

Мостовая компоновка М1 позволяет получить меньшую по сравнению с другими компоновками массу подвижных узлов при высокой жесткости и устойчивости. Данный тип компоновки используется в крупногабаритных КИМ разных классов точности (рис. 7.46) и является для них основным. У мостовой компоновки каретка с пинолью перемещается по подвижной траверсе, обоими своими концами базирующейся на горизонтальных неподвижных балках, которые на колоннах подняты над столом для установки детали. Привод и ИП измерительной системы траверсы крепятся к одной из балок. КИМ такой компоновки имеет ограниченный с трех сторон доступ для загрузки деталей и наблюдения за измерением. Для измерения сложных крупногабаритных деталей, а также для решения специальных задач мостовые КИМ комплектуются двумя траверсами с отдельными системами управления и обработки данных (рис. 7.46, вар. М2).

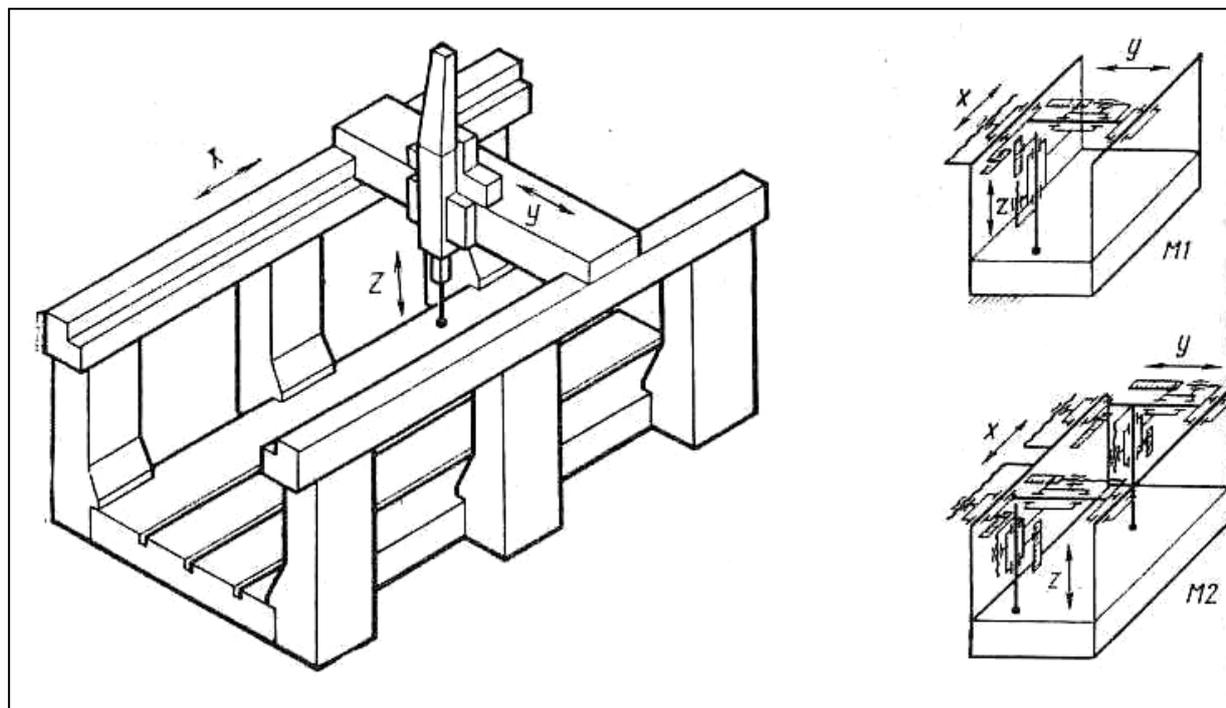


Рис. 7.46. Мостовая компоновка КИМ

При большой длине траверсы для исключения ее угловых колебаний в горизонтальной плоскости концы траверсы приводятся в движение своими приводами, а для повышения точности устанавливаются два ИП измерительной системы перемещения траверсы.

7.8.5. Примеры современных КИМ мостового типа

Последние 40 лет компания DEA занимает лидирующее место на мировом рынке в области производства мостовых КИМ. Современные революционные технологии, инновационные решения, сотрудничество и техническая поддержка пользователей позволили компании выйти на объем продаж в 1300 машин, которые работают в 42 странах.

Мостовая компоновка КИМ является идеальным решением для инспекционных и измерительных задач в работе с крупногабаритными деталями в таких отраслях производства, как тяжелое и транспортное машиностроение, аэрокосмическая промышленность.

Достоинствами данного оборудования является простота установки и

наладки, интеграция с внутрипроизводственными транспортными системами, простота в работе и обслуживании, наряду с высокой точностью, соответствующей мировым стандартам.

Машины оснащаются автоматической поворотной головкой Renishaw PH10M и, по выбору заказчика, любым из трех видов измерительных датчиков Renishaw: TP2 (стандартный), TP200 (повышенной точности), SP600M (сканирующая головка).

Диапазон размеров рабочей зоны машин данного типа ($X \times Y \times Z$) – от $3300 \times 2000 \times 1000$ до $10000 \times 4000 \times 2500$.

Серию мостовых КИМ производства компании DEA составляют следующие модели:

- Серия машин Alpha;
- Delta HA;
- Lambda SP.

ALPHA STATUS. Модель мостовой КИМ Alpha Status (рис. 7.47) является многоцелевой гибкой координатно-измерительной системой для размерного инспектирования крупногабаритных деталей машин и механизмов. Управление КИМ осуществляется системой ЧПУ, возможно управление в ручном режиме от джойстика с выносного пульта управления. Оснащенная оптическими сканирующими сенсорами система спо-



Рис. 7.47. КИМ серии ALPHA

собна производить быструю **дигитализацию** трехмерных объектов, фиксируя огромные массивы точек поверхности. Является идеальной инспекционной системой для предприятий, производящих прессформы, штампы, литейные формы, сложные формы и т.д.

КИМ имеет хорошие динамические характеристики:

- максимальная скорость перемещения 26 м/мин;
- максимальное ускорение 1 м/с².

ALPHA IMAGE. Модель КИМ повышенной точности Alpha Image оснащена прецизионными устройствами перемещения, с измерительными шкалами высокого разрешения, жестким керамическим шпинделем, системой линейной термокомпенсации.

Все машины модели ALPHA могут комплектоваться устройством с сервоприводом CW43L, предназначенным для инспекции труднодоступных мест деталей (опция) и защитными элементами шкал, предотвращающих их загрязнение (модели Status и Image).

КИМ ALPHA могут оснащаться магазином для автоматической смены измерительных датчиков и щупов, а также бесконтактным лазерным датчиком Wolf&Beck.

КИМ ALPHA стандартно комплектуется системой линейной термокомпенсации (3 датчика температуры машины и один датчик температуры детали).

DELTA HA .Delta HA (рис. 7.48) – линейка крупных мостовых КИМ, которые вмещают в себе большую рабочую зону, высокую точность и повторяемость измерений с надежностью работы в открытых цеховых условиях.



Рис. 7.48. КИМ серии DELTA HA

Прогрессивная механическая структура, двунаправленные датчики линейного положения главной направляющей, жесткий керамический шпиндель, измерительные шкалы высокого разрешения делают данные машины КИМ идеальными системами для инспектирования и дигитализации крупногабаритных высокоточных изделий.

Динамические характеристики:

- максимальная скорость перемещения 26 м/мин;
- максимальное ускорение 0.8 м/с².

КИМ DELTA может оснащаться магазином для автоматической смены измерительного инструмента.

Существует две модификации данной модели:

Delta HA – CR – оснащена системой линейной термокомпенсации для использования в чистых производственных условиях, с контролируемой температурой воздуха промышленной зоны.

Delta HA – CR – была разработана для применения в открытых производственных условиях. Система тепловой компенсации структуры A.C.T.I.V.[®] обеспечивает принудительную циркуляцию воздуха в корпусе, изолируя машину от внешних термовоздействий, позволяя проводить измерения должного качества в диапазоне температур 16 – 26 °С.

LAMBDA SP. Линейка особо крупных КИМ Lambda SP (рис. 7.49) для цехового применения обеспечивает высокую скорость и превосходные динамические и метрологические характеристики при работе с крупногабаритными деталями в таких отраслях, как судостроение, аэрокосмическая отрасль машиностроения и др.

Высокие характеристики и эксплуатационные показатели данных моделей КИМ обеспечиваются благодаря применению в их конструкции таких технологических решений как высокоточные датчики положения, прецизионные устройства перемещения, технология Slant Bridge, система термокомпенсации A.C.T.I.V.[®]. Возможность применения в качестве опции узла CW43L позволяет использовать длинные щупы и проводить инспектирование труднодоступных мест деталей.



Рис. 7.49. КИМ модели LAMBDA SP

Максимальная скорость перемещения, реализуемая на машине этой модели, – 35 м/мин.

7.8.6 Консольные компоновки КИМ

Консольные компоновки отличаются наличием горизонтальной, подвижной по одной или двум горизонтальным осям консоли. Когда консоль подвижна относительно основания по одной оси (компоновка К1, рис. 7.50), по консоли перемещается каретка, несущая вертикально подвижную пиноль с ИГ. Если консоль перемещается в каретке, подвижной относительно основания (компоновка К2, рис. 7.50), то пиноль движется по вертикальной оси относительно консоли.

КИМ консольного типа имеют лучшие по сравнению с порталной компоновкой П1 доступы для установки деталей и обзорность, а также лучше соблюдают принцип Аббе. Однако данной компоновке, имеющей

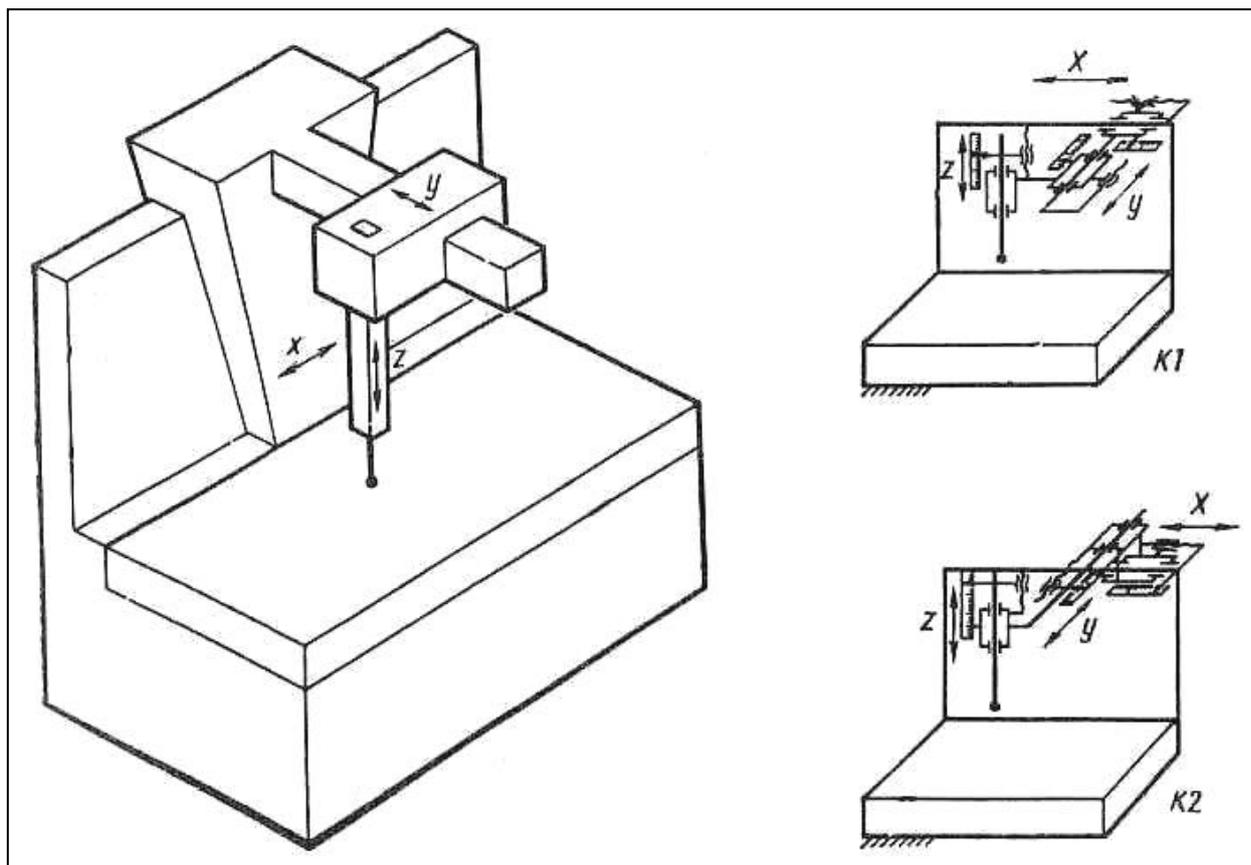


Рис. 7.50. Консольная компоновка КИМ

консоль со свободным концом, присущи значительные деформации последней, подшипников и узлов их базирования, снижающие точность КИМ. Машины этих компоновок очень чувствительны к изменению массы узлов, подвижных относительно консоли. Масса данных узлов должна быть минимальной, так как в противном случае для достижения высокой точности необходимо увеличение массы консоли, приводящее к увеличению ее угловых колебаний в процессе измерения, снижающих в свою очередь точность и быстродействие машины.

Вследствие деформации возникают смещения свободного конца консоли в вертикальном направлении и разворот пиноли в вертикальной плоскости. Известен ряд способов компенсации деформации консоли, подшипников

и узлов их базирования. Однако все они недостаточно эффективны. Такие компоновки используются для среднегабаритных производственных КИМ.

7.8.7. Стоечные компоновки КИМ

Стоечные компоновки характеризуются наличием подвижной или неподвижной относительно основания стойки, по которой в вертикальном направлении перемещается пиноль или суппорт. Наиболее характерные варианты исполнения данных компоновок представлены на рисунке 7.51.

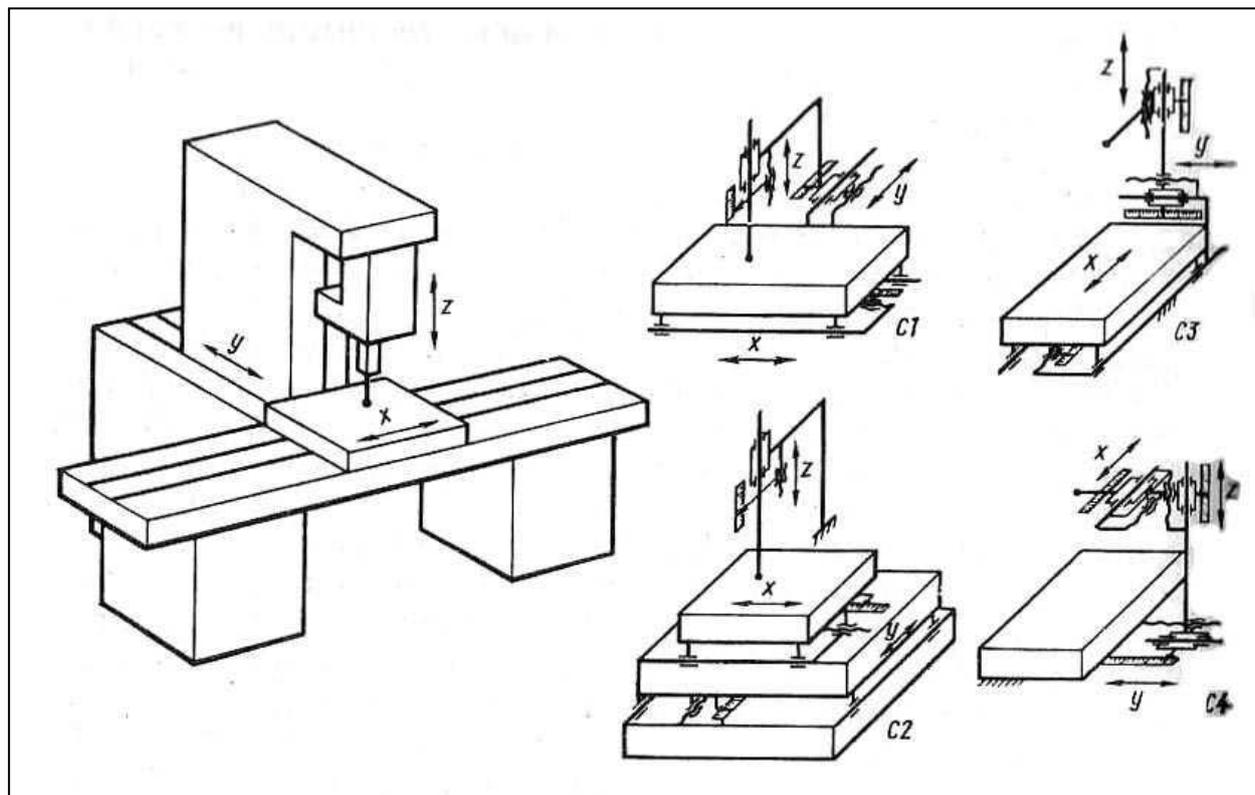


Рис. 7.51. Стоечная компоновка КИМ

Компоновка С1 с подвижным столом по одной горизонтальной координатной оси и стойкой с пинолью (или суппортом), несущими ИГ, по второй горизонтальной и вертикальной координатным осям обеспечивают высокую степень соблюдения принципа Аббе, имеют хороший доступ для установки детали и хорошую обзорность в процессе измерения, удобство ручного управления КИМ при положении оператора сидя. Координатные пере-

мещения таких компоновок ограничены и, как правило, не превышают 600 мм. Данные компоновки используются для прецизионных малогабаритных КИМ и предназначены для измерения малогабаритных высокоточных деталей и инструмента. Эти достоинства в полной мере относятся и к КИМ компоновки С2 (рис. 7.51) с неподвижной стойкой и подвижным по двум координатным осям столом. Область применения такой компоновки ограничивается измерением малогабаритных деталей сложной формы, удобной для измерения деталей сложной формы малых и средних габаритных размеров, в том числе с глубокими горизонтальными отверстиями, является КИМ стоечной компоновки С3 (рис. 7.51). В этой компоновке подвижными элементами являются:

- 1) стойка – вдоль одной горизонтальной оси относительно основания;
- 2) каретка – вдоль вертикальной оси относительно стойки. На каретке установлена переставная горизонтальная пиноль-удлинитель, на которой крепится ИГ;
- 3) стол – вдоль второй горизонтальной оси относительно основания.

Имея высокую универсальность, стоечная компоновка уступает рассмотренным ранее компоновкам по точности измерения. Кроме этого, ей присущи недостатки, свойственные компоновкам с подвижной деталью.

Свойствами стоечных КИМ обладают машины компоновки С4, в которых ИГ крепится к каретке, перемещающейся по горизонтальной поперечине небольшой длины, монтируемой на подвижной относительно стойки каретке (рис. 7.51). Для обеспечения доступа к измеряемым поверхностям КИМ такие компоновки комплектуются поворотными столами, сложными ИГ отклонения с длинными измерительными наконечниками или же головками, установленными на удлинителях, так как горизонтальный суппорт ограничивает доступ к глубоко расположенным измеряемым элементам. Поворотный стол предназначен для обеспечения вращения в процессе измерения детали относительно одной или двух осей.

На рис. 7.52 представлены два варианта стоечных компоновок с гори-

горизонтальной пинолью, общим признаком которых является наличие подвижной относительно основания по горизонтальной и вертикальной осям стойки и горизонтальной пиноли, к которой крепится ИГ.

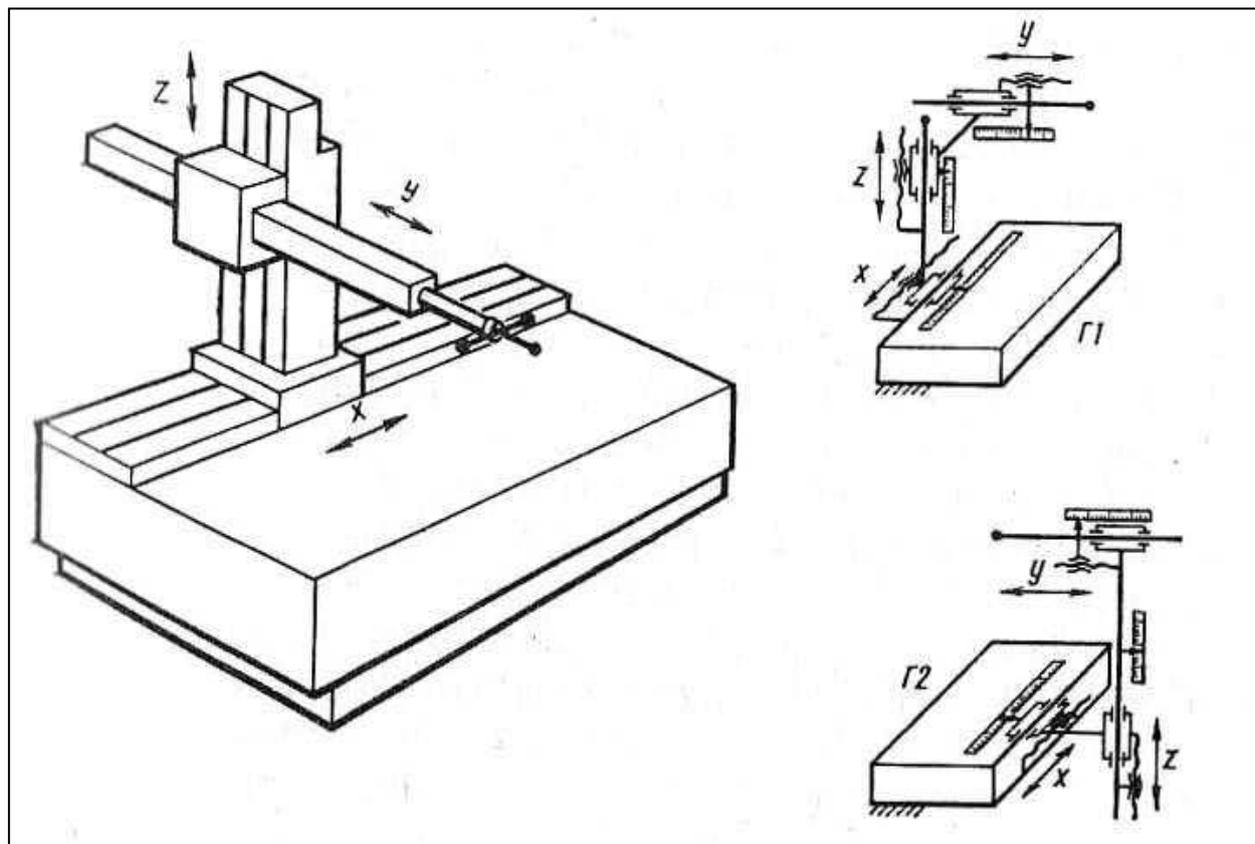


Рис. 7.52. Стоечные компоновки КИМ с горизонтальной пинолью

Данным компоновкам свойственно открытое пространство для установки и обзора детали в процессе измерения, легкость подвижных узлов, что представляет удобство при ручном управлении машиной. Однако КИМ данной компоновки еще более чувствительны к перемещению пиноли и изменению массы устанавливаемых на ней измерительных устройств из-за больших деформаций, в первую очередь пиноли, имеющей большую длину по сравнению с поперечным сечением, и стойки. Существенное значение имеют деформации пиноли от воздействия сил измерения. Компенсация деформаций от изменения массы ИГ, измерительного усилия, изменения положения каретки относительно стойки и вылета пиноли весьма затруднительна и желаемого эффекта не дает.

Стоечная компоновка используется в основном для КИМ пониженной

точности, предназначенных для измерения штампованных, сварных, литых и других деталей невысокой точности. Горизонтальное расположение пиноли представляет хорошие возможности для измерения глубоких отверстий, расположенных со стороны стойки. Подход с остальных сторон детали весьма ограничен. Это связано и с тем, что из-за малой жесткости горизонтальной пиноли и стойки применение составных ИГ и крупногабаритных установочных узлов головок, необходимых для доступа к отверстиям, расположенным глубоко и не со стороны стойки, связано с появлением значительных погрешностей. Универсальность КИМ стоечного типа с горизонтальной пинолью достигается за счет применения поворотного стола с вертикальной осью вращения, на котором располагается деталь, или посредством одновременной установки до четырех стоек с отдельными ИП с разных сторон основания. Во втором случае возможно измерение сразу с четырех сторон, за счет чего повышается производительность измерений. Это эффективно используется для измерения деталей с большим числом контролируемых параметров, когда измеряемые поверхности расположены с различных сторон детали. Многостоечные КИМ компоновки Г1 применимы и для измерения крупногабаритных деталей.

Компоновка Г2 (рис. 7.52), по сравнению с Г1, имеет лучшие динамические свойства, следовательно, и более высокое быстродействие, имеет практически полностью открытое измерительное пространство. Но для достижения указанных положительных свойств должны ограничиваться размеры и масса подвижной по двум координатным осям стойки. Такая компоновка используется для быстроходных КИМ среднегабаритных размеров, в том числе встраиваемых в ГПС.

7.8.8. Примеры современных КИМ стоечного типа с горизонтальной пинолью

Большой опыт инженеров фирмы DEА и практические результаты экс-

плуатации КИМ ведущими производственными предприятиями мира полностью учтены в серии горизонтальных КИМ DEA.

КИМ данного типа применяются для осуществления размерного инспектирования средне- и крупногабаритных изделий из листового металла, кузовов автомобилей.

Диапазон размеров рабочей зоны машин данного типа ($X \times Y \times Z$, мм) от 4000×1400 (2750 – конструкция с двумя стойками) 1500 до 12000×1500 (2950)×2600.

Современные модели данного типа:

- Bravo NT
- Maestro Runway
- Серия машин Vento
- Prima C1

BRAVO NT. Модельный ряд машин Bravo имеет повышенную надежность, высокие эксплуатационные характеристики, специально разработаны для осуществления активного размерного контроля кузовов автомобилей и их узлов, где необходим контроль точности, жесткости и других параметров в реальном времени.

Машина имеет модульную структуру (рис. 7.53) и, следовательно, может быть встроена в производственную линию, настроена под конкретную задачу.

К достоинствам системы можно отнести также простоту программирования и дружественный ин-

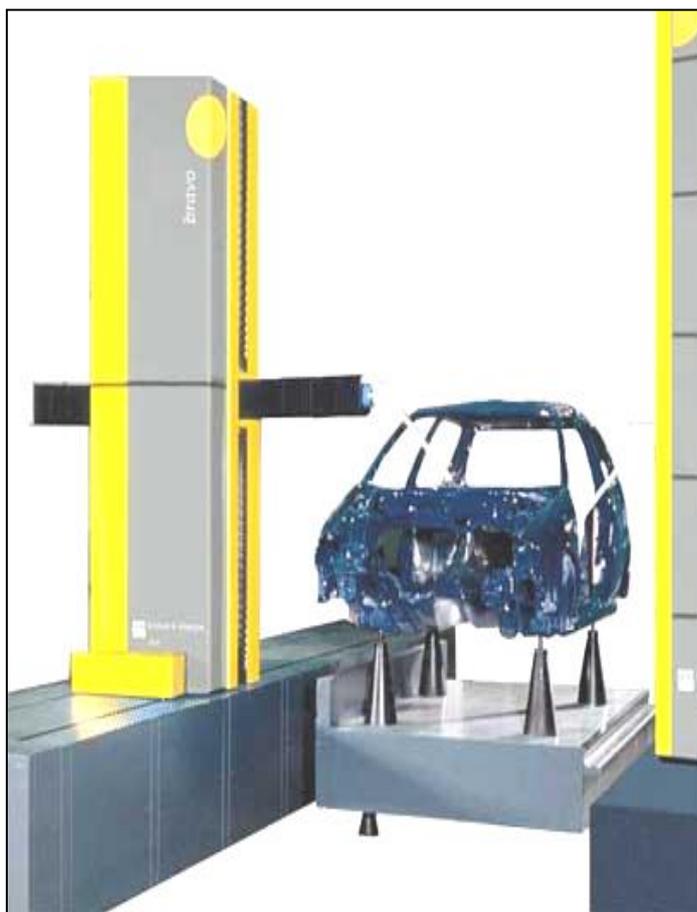


Рис. 7.53. Примеры современных КИМ стоечного типа с горизонтальной пинолью – Горизонтальная двустоечная КИМ мод. BRAVO NT

терфейс пользователя.

Использование нескольких оригинальных конструкторских решений делают КИМ Bravo устойчивой к жестким производственным условиям. Высокие скоростные показатели измерений (максимальная скорость – до 52 м/мин., ускорение – до 2,9 м/с²), непрерывная интерполяция координат и возможность точного позиционирования по трем осям позволяют считать данные измерительные системы одними из самых производительных в мире.

MAESTRO RUNWAY. Maestro – новая серия горизонтальных многофункциональных измерительных машин повышенной надежности, разработанная для проведения высокоточного размерного инспектирования кузовов автомобилей в производственных условиях (рис. 7.54).

Управление машинами осуществляется компьютером. Модели данной

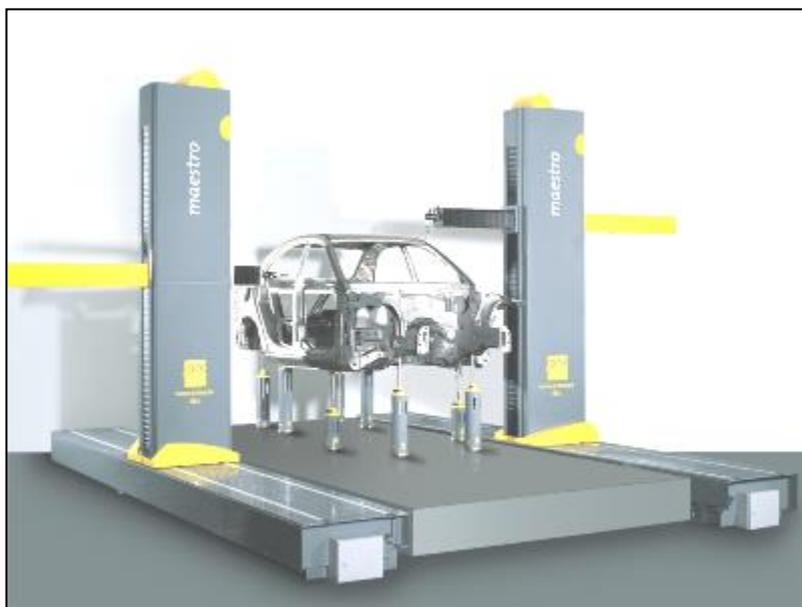


Рис. 7.54 КИМ стоечного типа мод. MAESTRO RUNWAY

серии характеризуются высокими динамическими и точностными показателями, имеют широкий измерительный диапазон, максимально производительны и эффективны в применении. Возможны исполнения КИМ с одной и двумя стойками. Оснащаются контактными и бесконтактными датчиками, что позволяет выполнить любые метрологические задачи.

VENTO RUNWAY И VENTO CONSOLE. Vento – многофункциональная измерительная система, обладающая инновационным высокотехно-логичным

дизайном, прочной конструкцией, большим числом контролируемых параметров, широким спектром приспособлений и измерительных датчиков (рис. 7.55).

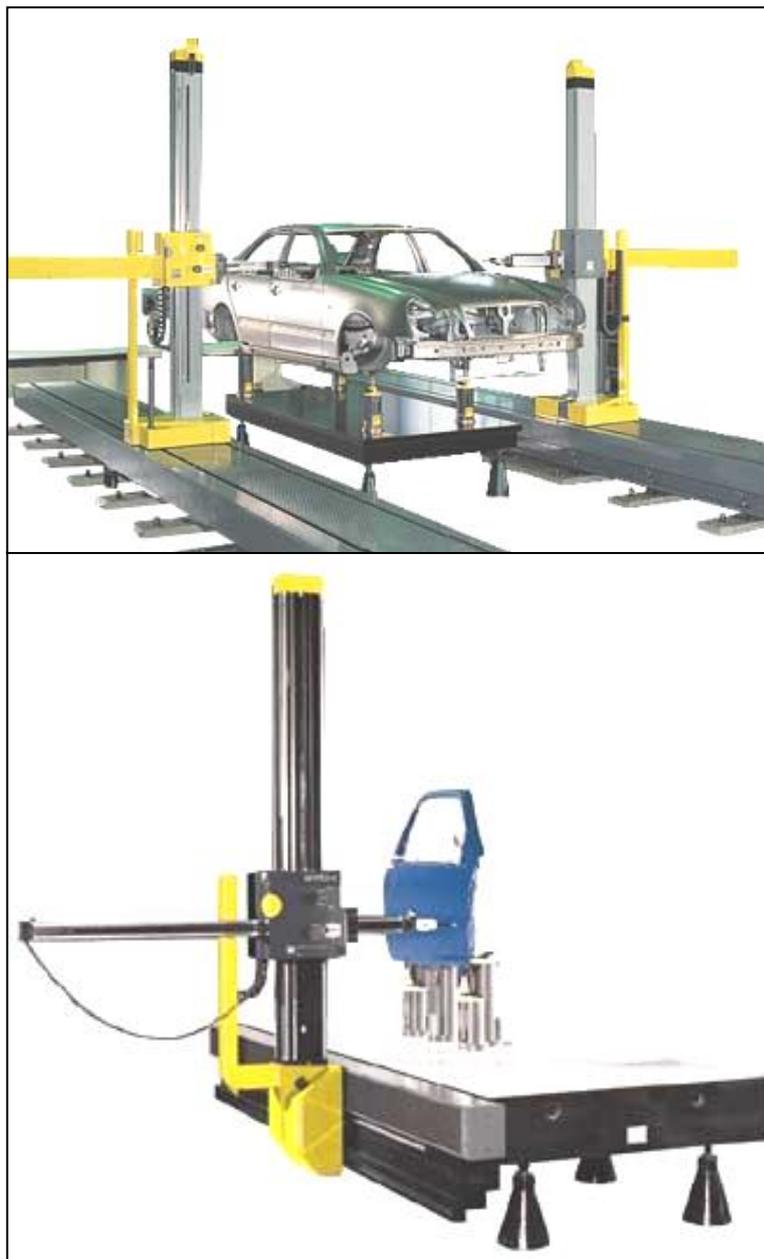


Рис. 7.55 КИМ стоечного типа:
 мод. VENTO RUNWAY (вверху),
 мод. VENTO CONSOLE (внизу).

ния рабочих образцов запатентованной конструкции.

Основными достоинствами машин данной серии являются высокая точность, надежность, простота использования в совокупности с высокой эргономичностью конструкции.

Конструкционные и эксплуатационные характеристики данных КИМ отвечают всем мировым стандартам.

Открытая конструкция облегчает доступ в рабочую зону и к контролируемому объекту, с возможностью выполнения автоматической операции загрузки/выгрузки. Возможно исполнение с одной и с двумя стойками. Машины могут быть оснащены уникальной системой крепления

PRIMA C1. Горизонтальная КИМ с ЧПУ Prima (рис. 7.22) является одной из наиболее рентабельных систем для применения в производственных условиях, имеет одностоечную конструкцию, с боковым расположением стойки, обладает высокой гибкостью и позволяет производить измерения крупногабаритных деталей различной конфигурации. Продуманный дизайн, отличные механические характеристики конструкции, плюс широкий спектр применяемых сенсоров, головок и принадлежностей делают данную модель КИМ с ЧПУ простой и удобной в эксплуатации.



Рис. 7.55. Горизонтальная КИМ мод. PRIMA C1

Использование станины с трехточечной опорой не требует дополнительных затрат на установку. Прочная конструкция дополняется встроенной системой линейной термокомпенсации, что позволяет увеличить точность и достоверность измерений.

Модель может оснащаться узлом CW43L (высокоточный шарнир), лазерными сенсорами, датчиками непрерывного сканирования, магазинами автоматизированной смены инструмента.

7.9. Средства реализации измерений в КИМ

7.9.1. Устройства взаимодействия с измеряемой деталью

Устройство взаимодействия с измеряемой деталью (измерительный щуп, измерительная головка, контактные и бесконтактные измерительные датчики) обеспечивает связь поверхности измеряемой детали с измерительными системами координатных перемещений КИМ, являясь подвижным элементом координатной системы КИМ. Поскольку при измерении методом

сравнения с мерой КИМ выступает в качестве прибора сравнения, то устройство взаимодействия с измеряемой поверхностью воспринимает как бы два сигнала – сигнал о фактическом положении поверхности детали и сигнал с датчиков перемещений измерительных систем КИМ.

Функциональные показатели и конструкция устройства взаимодействия с измеряемой поверхностью в значительной мере определяют точность измерений и метрологические возможности КИМ, оказывают существенное влияние на выбор структуры КИМ, ее системы управления и непосредственно влияют на уровень автоматизации КИМ.

На рисунках 7.56 показаны основные элементы и связи между ними систем измерения КИМ, производства компании Renishaw.

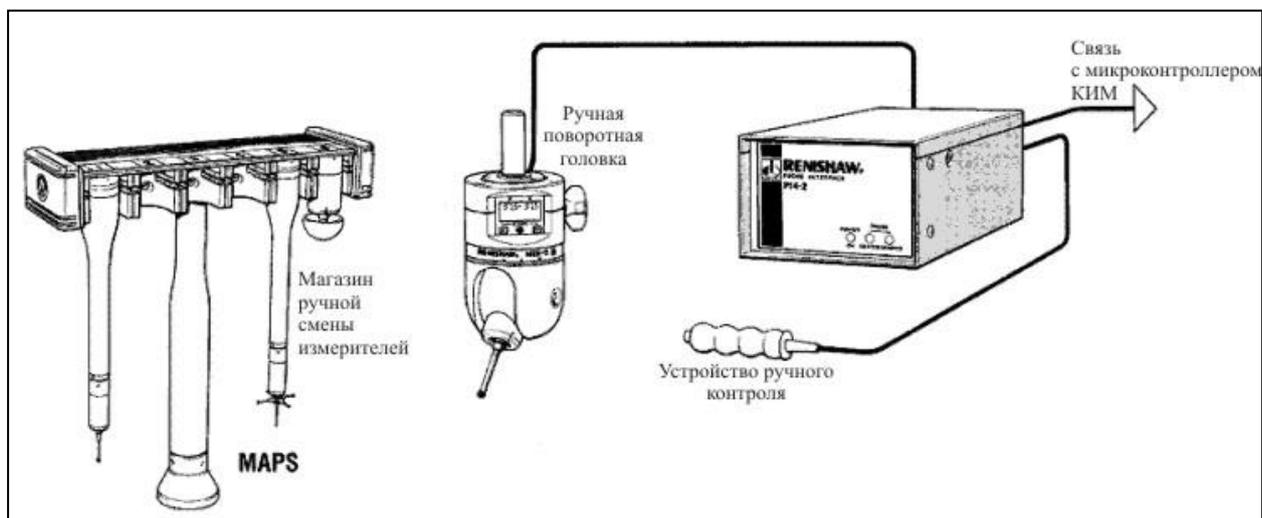


Рис. 7.56. Элементы системы измерения для КИМ с ручным управлением.

В общем случае системы измерения КИМ состоят из следующих элементов:

- 1) измерительный щуп (stylus (рис. 7.57);
- 2) контактный датчик (trigger probe);
- 3) головка датчика (probe head);
- 4) интерфейсные адаптеры (коммутаторы, контроллеры и т.д), соединительные кабели.

Дополнительно могут использоваться магазины смены измерителей, пульты ручного управления, удлинительные элементы и другие элементы.



Рис. 7.57. Наборы измерительных щупов

Измерительные щупы. Измерительный щуп представляет собой ту часть датчика, которая соприкасается с деталью, в результате чего датчик генерирует выходной сигнал. Существует обширный ряд измерительных щупов, конструкция и характеристики которых соответствуют конкретным условиям применения. Хотя в настоящее время щупы, которые ранее предназначались для специальных задач, теперь стали использоваться в стандартной практике.

Конструкция и размер щупа определяется контролируемым элементом. Но в любом случае необходимо обеспечить максимальную жесткость и сферичность наконечника щупа. Особое внимание при разработке обращается на то, чтобы базовые поверхности обеспечивали максимальную жесткость, а вес щупов был оптимизирован благодаря применению различных материалов, с учетом конкретного типа датчика и выполняемой задачи.

Контактные датчики и измерительные. Для повышения универсальности и уровня автоматизации КИМ в настоящее время под понятием измерительного сенсора КИМ или, как в общем называется этот элемент компоновки – измерительной головки, принято понимать некий механизм, выполняющий функции измерения перемещения измерительного щупа и выдачи упорядоченного сигнала по определенному протоколу на управляющий вычислительный комплекс машины. Современные системы измерений КИМ предусматривают возможность использования одной головки датчика с измерительными датчиками различной точности. При этом процесс смены измерительного датчика с соответствующим щупом легко поддается автоматизации за счет применения магнитного механизма самоустановки, который обеспечивает высокую точность базирования и повторяемость результатов

измерений. В свою очередь, для расширения функциональных возможностей КИМ применяют управляемые поворотные головки датчиков, имеющие степени свободы в двух плоскостях, позволяющие выполнять переориентацию датчика таким образом, чтобы датчик со щупом был направлен к контролируемой детали под оптимальным углом, для получения наиболее точных результатов.

Все ИГ по принципу функционирования подразделяются на две группы:

1) нулевые головки, работающие в режиме триггера. Головки выдают импульсный пороговый сигнал при малом (от долей микрона до нескольких микрометров) отклонении измерительного наконечника относительно корпуса головки, при касании измерительным наконечником поверхности детали (головка касания) или при прохождении измерительным наконечником некоторой фиксированной относительно корпуса нулевой точки;

2) головки отклонения, измеряющие перемещение наконечника относительно корпуса головки.

Головки отклонения, в свою очередь, классифицируются:

– модульные (сигнал, снимаемый с головки, пропорционален модулю смещения наконечника относительно фиксированной нулевой точки);

– компонентные (выходные сигналы головки пропорциональны компонентам перемещения наконечника относительно фиксированной нулевой точки в системе координат головки).

Одним из важнейших узлов головок отклонения является механизм создания измерительного усилия. В зависимости от конструкции этого узла различают головки самоустанавливающиеся, наконечник которых самоустанавливается по нормали к поверхности (контур), и головки управляемые, с принудительной ориентацией измерительного наконечника.

По виду взаимодействия с измеряемой поверхностью и принципу действия ИГ подразделяются на контактные и бесконтактные, механические, электроконтактные, оптические; пневматические и др.

Кроме этого, различают головки двух- и трехкоординатные.

На рис. 7.58 представлена схема измерительной головки с основными составляющими ее узлами и системами, которые для головок различного назначения имеют разное конструктивное исполнение и осуществляют различные функции. Такими характерными для ИГ элементами являются: корпус, *1* в котором монтируются все остальные узлы; узел установки *2* (базирования, подвески) измерительного щупа; простой или сложный измерительный наконечник *3*, состоящий из отдельных соединенных между собой стержней *4*, к

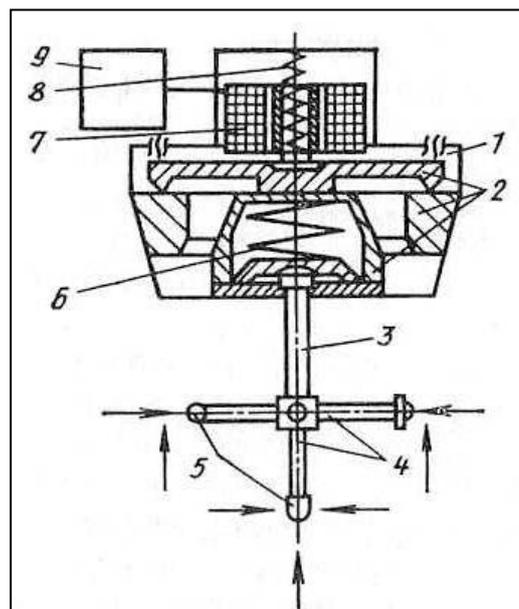


Рис. 7.58. Принципиальная схема измерительной головки

концам которых крепятся контактные элементы *5*; предохранитель *6* от поломки в случае большого смещения наконечника (например, при аварийном столкновении с деталью); чувствительные элементы *7*, реагирующие на перемещение измерительного наконечника; узел создания измерительного усилия и ориентации *8*; электронная схема питания и обработки сигналов *9*. Узел установки измерительного наконечника позволяет ему перемещаться по определенному закону при соприкосновении наконечника с деталью и передает данное перемещение на чувствительный элемент. Некоторые узлы могут отсутствовать, и функции отдельных узлов – совмещаться.

Представленная на рис. 7.58 ИГ работает следующим образом: при отклонении наконечника *3* в любом из показанных стрелками направлений опорный диск узла *2* поворачивается относительно оси, перпендикулярной оси головки, или смещается вдоль ее оси и смещает связанный с ним якорь индуктивного датчика *7*. Это вызывает изменения электрического сигнала, что и используется для определения момента соприкосновения измерительного наконечника с деталью. При значительном смещении наконечника свя-

занный с ним диск предохранителя от поломки б перемещается относительно втулки, соединенной с диском узла 2, имеющим значительно меньший предел перемещения, чем диск предохранителя б.

ИГ, подобные головкам КИМ, широко распространены в станках с ЧПУ для промежуточного измерения деталей, наладки и контроля износа режущего инструмента.

7.9.2. Измерительные системы для КИМ производства компании Renishaw plc (Великобритания)

Компания Renishaw занимает лидирующие позиции в мире в области производства измерительных систем для координатно – измерительных машин.

Большинство компаний – изготовителей КИМ используют системы Renishaw как стандартную комплектацию к выпускаемым машинам.

Системы контактных датчиков. В настоящее время имеется обширный ряд систем Renishaw, позволяющих решать разнообразные производственные задачи с учетом финансовых возможностей пользователя. Спектр этих задач включает в себя процедуры от простого размерного контроля на ручных КИМ до высокоскоростных инспекционных задач сложных поверхностей на КИМ с ЧПУ.



Рис. 7.59. Датчик TP200 с узлом установки щупа

Система TP200. Система включает элементы:

- 1) датчик TP200;
- 2) узел установки измерительного щупа TP200 с регулируемым диапазоном усилий срабатывания;
- 3) интерфейсный адаптер PI200;
- 4) магазин смены измерительных щупов.

ПОВ.

Датчик TP200 (рис. 7.59) основан на использовании микротензодатчика и предназначен для проведения высокоточного размерного инспектирования 3D – поверхностей любой сложности с применением щупов большой длины (до 100 мм) и различной конфигурации. Превосходные точностные характеристики датчика сочетаются с высокой продолжительностью срока службы – не менее 10 млн срабатываний.

Узел установки измерительного щупа TP200 соединен с датчиком посредством высокоточного магнитного кинематического сочленения, описанного ранее.

Магазин смены измерителей SCR200 (рис. 7.60) обеспечивает быструю автоматическую смену щупов, не требуя повторного переопределения геометрических характеристик последних.

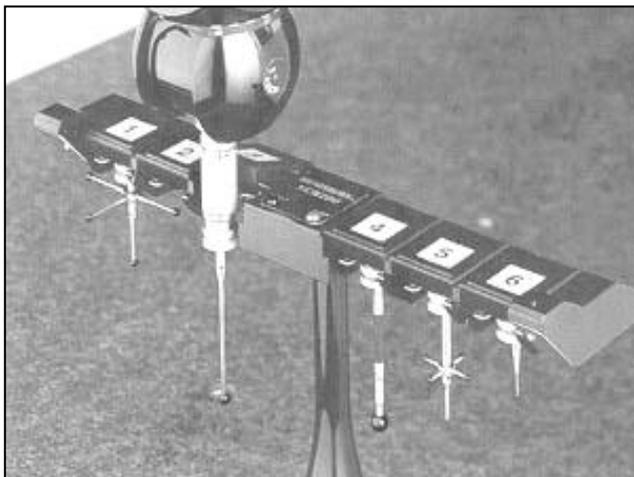


Рис. 7.60. Магазин смены измерительных щупов

метрических характеристик последних.

Контактный датчик TP7M – датчик повышенной точности на основе сверхточного тензометрического сенсора (рис. 7.61, 7.62). Используется совместно с электроприводной головкой мод. PH10M. Применяемые измерительные щупы – до 150 мм. Возможно приме-

нение магазина автоматической смены щупов.

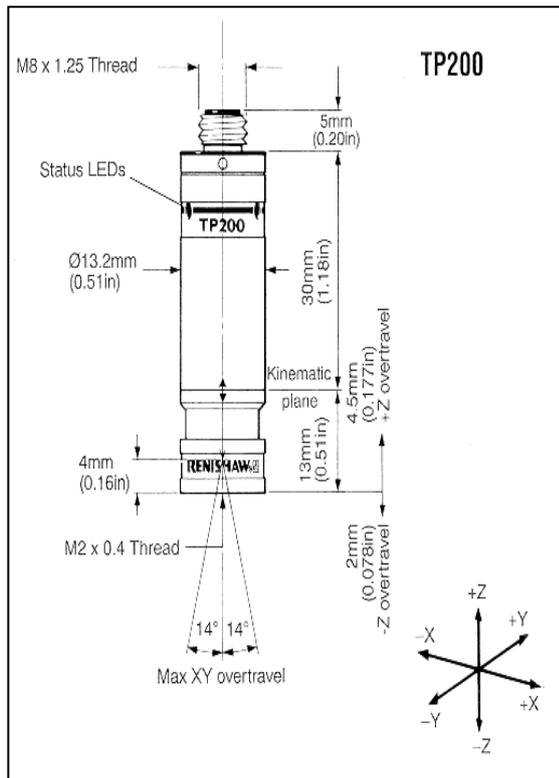


Рис. 7.61. Геометрические характеристики системы TP200

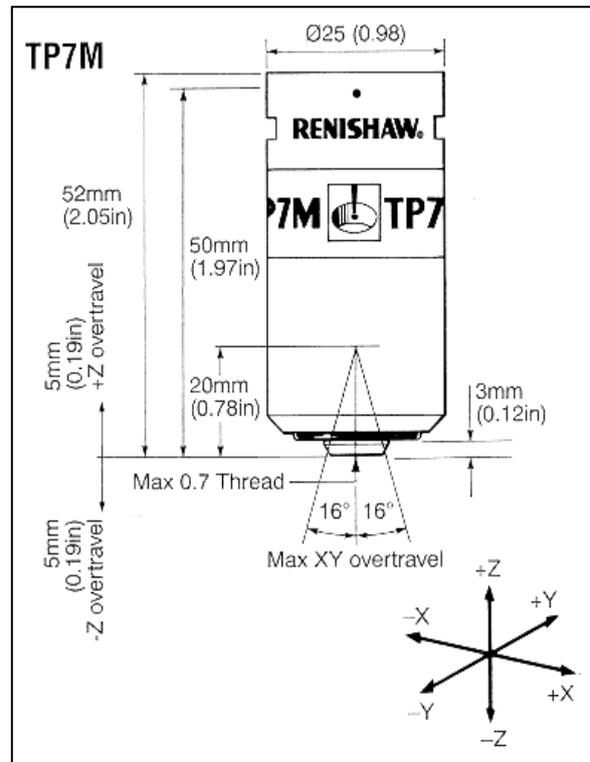


Рис. 7.62. Геометрические характеристики системы TP7M

Техническими характеристиками систем TP200, TP7M и TP20 представлены в табл. 7.4, 7.5 и 7.6.

Таблица 7.4 – Техническая характеристика системы TP200

Характеристика	Система TP200
Применение	КИМ повышенной точности, КИМ с ЧПУ
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Повторяемость Max (2σ)	Уровень срабатывания 1 0,40 мкм Уровень срабатывания 2 0,50 мкм
Вариация (плоскость XY)	Уровень срабатывания 1 $\pm 0,80$ мкм Уровень срабатывания 2 $\pm 0,90$ мкм
Вес (датчик и узел установки щупа)	22 г
Усилия срабатывания: - плоскость XY - ось Z	Стандартное 0,02 Н Пониженное 0,02 Н Стандартное 0,07 Н Пониженное 0,07 Н

Условия проведения анализа точности системы	Длина щупа – 50 мм Скорость перемещения – 480 мм/мин
Метод крепления	Резьбовое соединение М8
Совместимый интерфейс	PI200

Таблица 7.5 – Техническая характеристика системы TP7M

Характеристика	Система TP7M
Применение	КИМ с ЧПУ
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Повторяемость Мах (2σ)	Уровень срабатывания 1 0,25 мкм Уровень срабатывания 2 0,25 мкм
Вариация (плоскость XY)	Уровень срабатывания 1 $\pm 0,25$ мкм Уровень срабатывания 2 $\pm 0,50$ мкм
Вес	85 г
Усилие срабатывания: - плоскость XY - ось Z	0,02 Н 0,15 Н
Условия проведения анализа точности системы	Длина щупа – 50 мм Скорость перемещения – 480 мм/мин
Совместимый интерфейс	PI 7-2
Диапазон скорости измерения	0,5 – 40 мм/с

Система TP20. Измерительная система TP20 (рис. 7.63) представляет собой идеальное решение для измерения параметров деталей сложной формы, когда для получения исчерпывающей информации об объекте необходимо произвести измерения, применяя целый ряд конфигураций щупов.

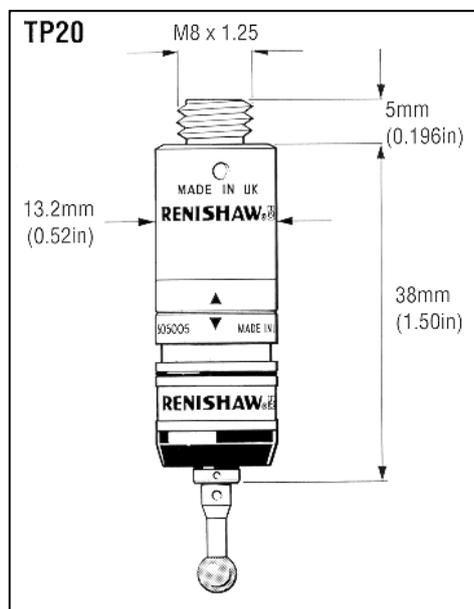


Рис. 7.65. Геометрические характеристики системы TP20

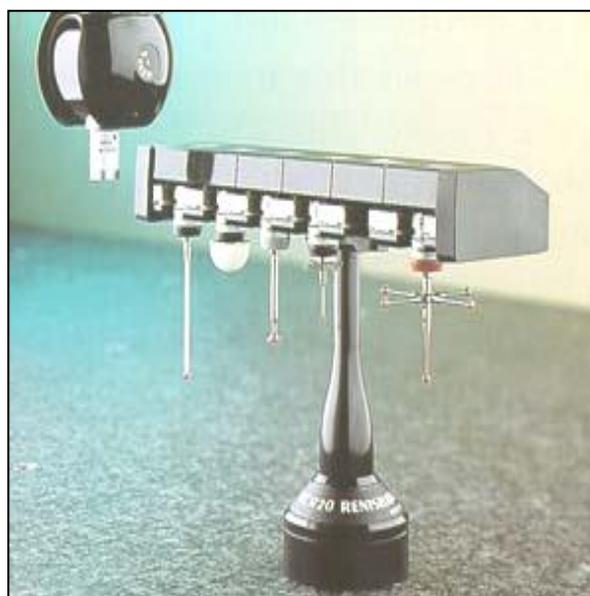


Рис. 7.64. Магазин смены измерительных щупов MCR20



Рис. 7.63. Датчик TP20 с модулем установки щупа

При помощи сменных модулей установки щупа с различными усилиями срабатывания можно точно настроить датчик согласно выполняемым задачам. Система TP20 подходит для модернизации как ручных, так и КИМ с ЧПУ и совместима с существующими интерфейсами контактных датчиков.

Система включает:

- 1) датчик TP20;
- 2) модули установки измерительного щупа TP20 с различным усилием срабатывания (стандартное, среднее, увеличенное);
- 3) интерфейсный адаптер PI200;
- 4) магазин смены щупов MCR20 (рис 7.64).



Рис. 7.66. Контактный датчик TP2 – 5W

Контактный датчик TP2 – 5W – является одним из самых распространенных и известных продуктов компании Renishaw (рис. 7.66). Применяется как для ручных, так и для КИМ с ЧПУ. Совместим с большинством головок Renishaw. Обеспечивает высокие точностные показатели, имеет регулируемое усилие срабатывания.

Таблица 7.6 – Техническая характеристика системы TP20

Характеристика	Система TP20
Применение	Ручные КИМ, КИМ с ЧПУ
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, +Z$
Повторяемость (плоскость XY) Max (2σ)	Стандартное усилие срабатывания 0,35 мкм Среднее усилие срабатывания 0,50 мкм Увеличенное усилие срабатывания 0,65 мкм
Вариация (плоскость XY)	Стандартное усилие срабатывания $\pm 0,80$ мкм Среднее усилие срабатывания $\pm 1,00$ мкм Увеличенное усилие срабатывания $\pm 2,00$ мкм
Вес (датчик и модуль установки щупа)	22 г
Относительные смещения щупа: - плоскость XY - ось Z	Для всех типов модулей $\pm 14^\circ$ Стандартное усилие срабатывания 4 мм Среднее усилие срабатывания 3,7 мм Увеличенное усилие срабатывания 2,4 мм
Условия проведения анализа	Длина щупа – 10 мм

точности системы	Скорость перемещения – 480 мм/мин
Метод крепления	Резьбовое соединение М8
Совместимый интерфейс	PI 4-2, PI 200, PI 7-2

Контактный датчик TP1(S) – крупный, прочный датчик с широким диапазоном перебега щупа и регулируемым усилием срабатывания. Имеет хвостовик для крепления в шпиндель КИМ. Передача сигнала осуществляется по внешнему кабелю. Идеально подходит для работы на ручных КИМ. Геометрические характеристики датчиков TP2-5W и TP1(S) представлены на рисунке 7.67, а технические характеристики сведены в таблицу 7.7.

Контактные датчики TP6 и TP6A (рис. 7.36) – имеют высокую точность и могут работать с более длинными измерительными щупами по сравнению с меньшими по габаритам датчиками TP2/TP20. Имеют конструкцию повышенной прочности, широкий диапазон хода щупа и настраиваемое усилие срабатывания. Характеристики датчиков даны в таблице 7.8.

Ручной поворотный датчик MIP (manual indexable probe) Представляет собой комбинацию контактного датчика и головки датчика (рис. 7.69.). Имеет 168 фиксированных положений, выбираемых вручную. После смены положения нет необходимости в повторной калибровке.

Таблица 7.7 – Техническая характеристика датчиков TP2-5W и TP1(S)

Характеристика	TP2-5W	TP1(S)
Применение	Универс. КИМ с ЧПУ	Ручные КИМ
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, +Z$	
Повторяемость Мах (2σ)	0,35 мкм	0,5 мкм
Вариация (плоскость XY)	$\pm 0,8$ мкм	± 2 мкм
Вес	22 г	128 г (без кабеля)
Диапазон регулирования усилия срабатывания	0,07-0,15 Н	0,1-0,5 Н
Усилие срабатывания (настройка производителя)	0,07-0,08 Н	0,15 Н
Смещения щупа: - плоскость XY - ось Z	$\pm 14,0^\circ$ 4,0 мм @ 0,07 Н 3,0 мм @ 0,15 Н	$\pm 19,5^\circ$ 8,5 мм @ 0,1 Н 5,0 мм @ 0,5 Н
Условия анализа точности : - Длина щупа - Скорость перемещения - Усилие срабатывания	10 мм 480 мм/мин 0,07-0,08 Н	31 мм 480 мм/мин 0,15 Н
Метод крепления	Резьбовое соед. М8	Хвостовик
Совместимый интерфейс	PI 4-2, PI 200, PI 7-2	

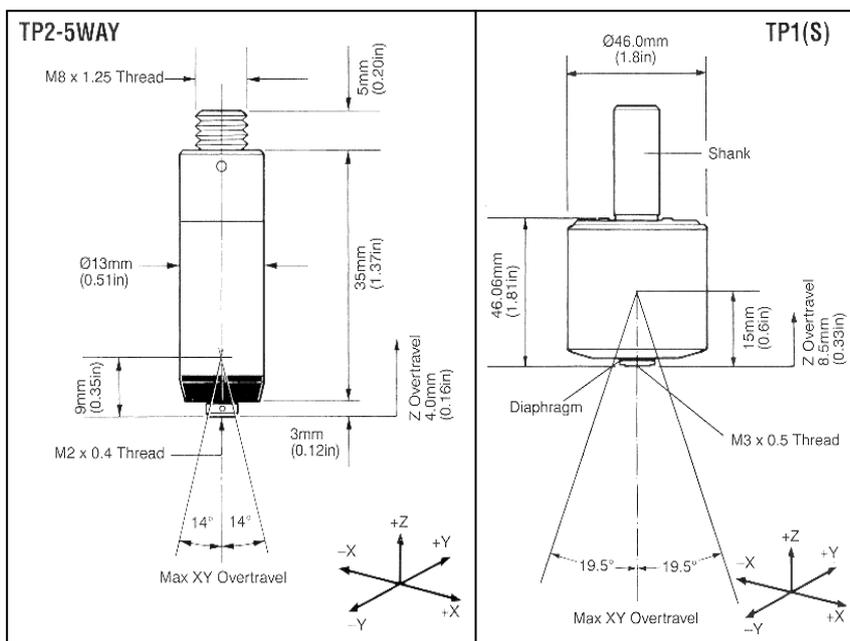


Рис. 7.67. Геометрические характеристики контактных датчиков TP2-5W (слева) и TP1(S) (справа)

Усилие срабатывания датчика – регулируемое. Длина применяемых измерительных щупов – до 60 мм. Крепление датчика осуществляется непосредственно к шпинделю КИМ, а сигналы передаются по внешнему кабелю.

Таблица 7.8 – Техническая характеристика датчиков TP6 и TP6A.

Характеристика	TP6	TP6A
Применение	Универсальные КИМ с ЧПУ и ручные	
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, +Z$	
Повторяемость Max (2σ)	0,35 мкм	
Вариация (плоскость XY)	$\pm 0,60$ мкм	
Вес	56 г	76 г
Диапазон регулирования усилия срабатывания	0,11-0,3 Н	
Значение усилия срабатывания (настройка производителя)	0,11-0,13 Н	
Относительные смещения щупа:	$\pm 22,0^\circ$	
- плоскость XY	5,50 мм @ 0,11 Н	
- ось Z	2,0 мм @ 0,13 Н	
Условия проведения анализа точности системы:	21 мм	
- Длина щупа	480 мм/мин	
- Скорость перемещения	0,11-0,13 Н	
- Усилие срабатывания		
Метод крепления	Резьбовое соединение M8	высокоточное магнитное кинематическое сочленение
Совместимый интерфейс	PI 4-2, PI 200, PI 7-2	

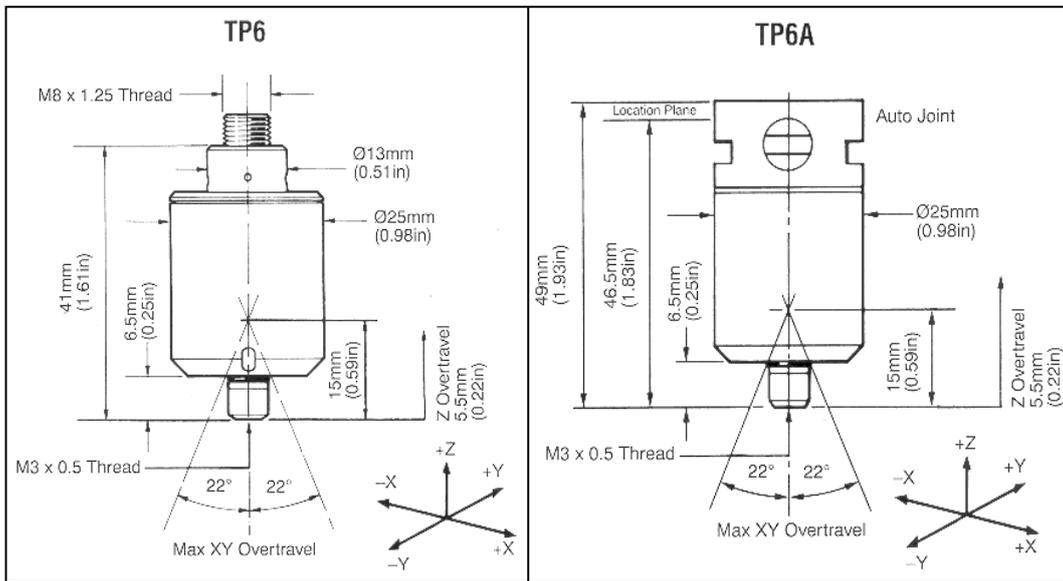


Рис. 7.68. Геометрические характеристики контактных датчиков TP6 (слева) и TP6A (справа)

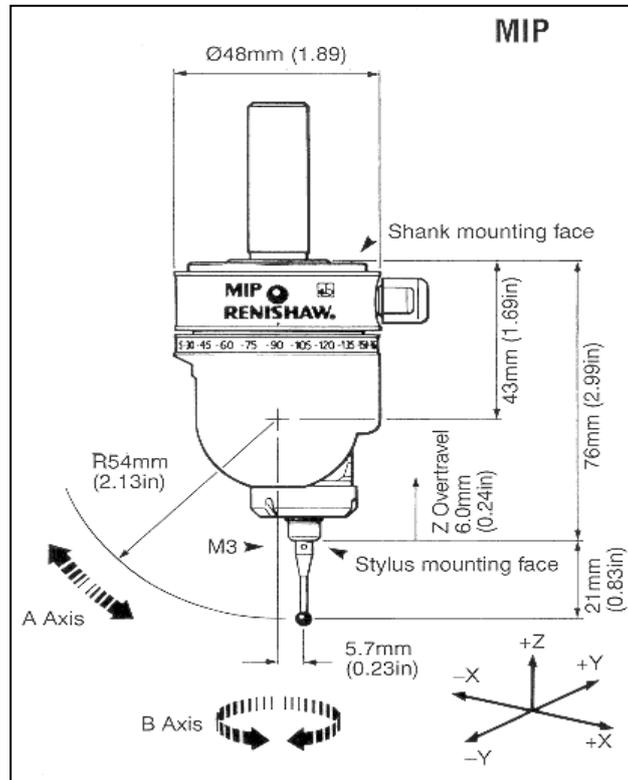


Рисунок 7.69. Геометрические характеристики системы TP20

Таблица 7.9 – Техническая характеристика системы MIP

Характеристика	Система MIP
Применение	Ручные КИМ
Координаты срабатывания	$\pm X, \pm Y, +Z$
Повторяемость Max (2σ)	0,35 мкм
Вариация	$\pm 1,00$ мкм
Вес (без хвостовика и кабеля)	200 г

Диапазон регулирования усилия срабатывания	0,1-0,3 Н
Значение усилия срабатывания (настройка производителя)	0,11-0,13 Н
Относительные смещения щупа: - плоскость XY - ось Z	±20,0° 6,0 мм @ 0,12 Н 3,0 мм @ 0,3 Н
Условия проведения анализа точности системы - Длина щупа -Скорость перемещения -Усилие срабатывания	21 мм 480 мм/мин 0,1-0,13 Н
Метод крепления	Хвостовик
Совместимый интерфейс	PI 4-2, PI 200, PI 7-2

Контактные сканирующие датчики для КИМ. Датчики мод. SP600 и SP600M – аналоговые сканирующие датчики, предназначенные для проведения высокоточного трехмерного сканирования профиля поверхностей на КИМ (рис. 7.70). Они обеспечивают быстрый сбор большого количества данных, что дает значительно больше информации о детали за более короткий промежуток времени по сравнению с контактными датчиками. Низкое значение усилия срабатывания делает возможным сканирование деликатных материалов.

Благодаря использованию USS1 – универсального устройства управления КИМ компании Renishaw – сканирование может осуществляться на небольших, более легких и более скоростных машинах, чем было необходимо ранее.

Датчики обеспечивают отклонение щупа в диапазоне 1 мм в каждом направлении (X, Y, Z). Длина используемых щупов может достигать 200 мм.



Самоцентрирующий механизм датчика обеспечивает возврат щупа в нулевую позицию с максимальной погрешностью, не превышающую 5 мкм.

Использование датчика SP600M совместно с электроприводной головкой RH10M существенно расширяет возможности сканирования, позволяя размещать щуп под наиболее удобным углом к измеряемой поверхности. Также можно использовать пассивный магазин смены измерительных щупов SCR600. Технические характеристики сканирующих датчиков приведены в таблице 7.10.

Рис. 7.70. Сканирующие датчики мод. SP600 и SP600M

Технические характеристики сканирующих датчиков приведены в таблице 7.10.

Таблица 7.10 – Техническая характеристика датчиков SP600/SP600M

Характеристика	Аналоговые датчики SP600 и SP600M
Координаты измерений	3D (X, Y, Z)
Диапазон измерений	±1 мм по каждой оси
Разрешение	0,1 мкм с интерполятором AC2 1 мкм с интерполятором AC1
Жесткость пружины	1,2 Н/мм (X, Y, Z)
Демпфирование	20% (X, Y, Z)
Вес	SP600 – 172 г (без хвостовика) SP600M – 216 г Щуп – максимально 20 г
Рабочая температура	10 – 40 °C
Защита от повреждений	Кинематическая защита от повреждения по всем осям
Выходные сигналы	Аналоговый сигнал, от 4 до 8,5 В/мм, в зависимости от длины измерительного щупа
Метод крепления	SP600 – хвостовик SP600M – высокоточное кинематическое соединение
Совместимый интерфейс	Интерполяторы AC1 или AC2

Ручные головки датчиков для КИМ. Ручная головка, устанавливаемая на КИМ, позволяет выполнять переориентацию датчика таким образом, чтобы датчик со щупом был направлен к контролируемой детали под оптимальным углом, для получения наиболее точных результатов.

Ручная головка мод. МИН (manual indexable head) – универсальная поворотная головка датчика, обеспечивающая высокую повторяемость измерений в 720 фиксированных положениях, совместима с большинством датчиков Renishaw. Результаты программирования индицируются на встроенном ЖК – дисплее. Крепление датчика осуществляется посредством высокоточного кинематического соединения (рис. 7.71).

Модификация головки МИН-S – усовершенствованная версия головки датчика МИН, в которой обратная связь с контроллером КИМ осуществляется посредством интерфейса RS-232C. Геометрические характеристики головок приведены на рисунке 7.72, а основные технические характеристики сведены в таблице 7.11.



Рис. 7.71. Высокоточное кинематическое соединение

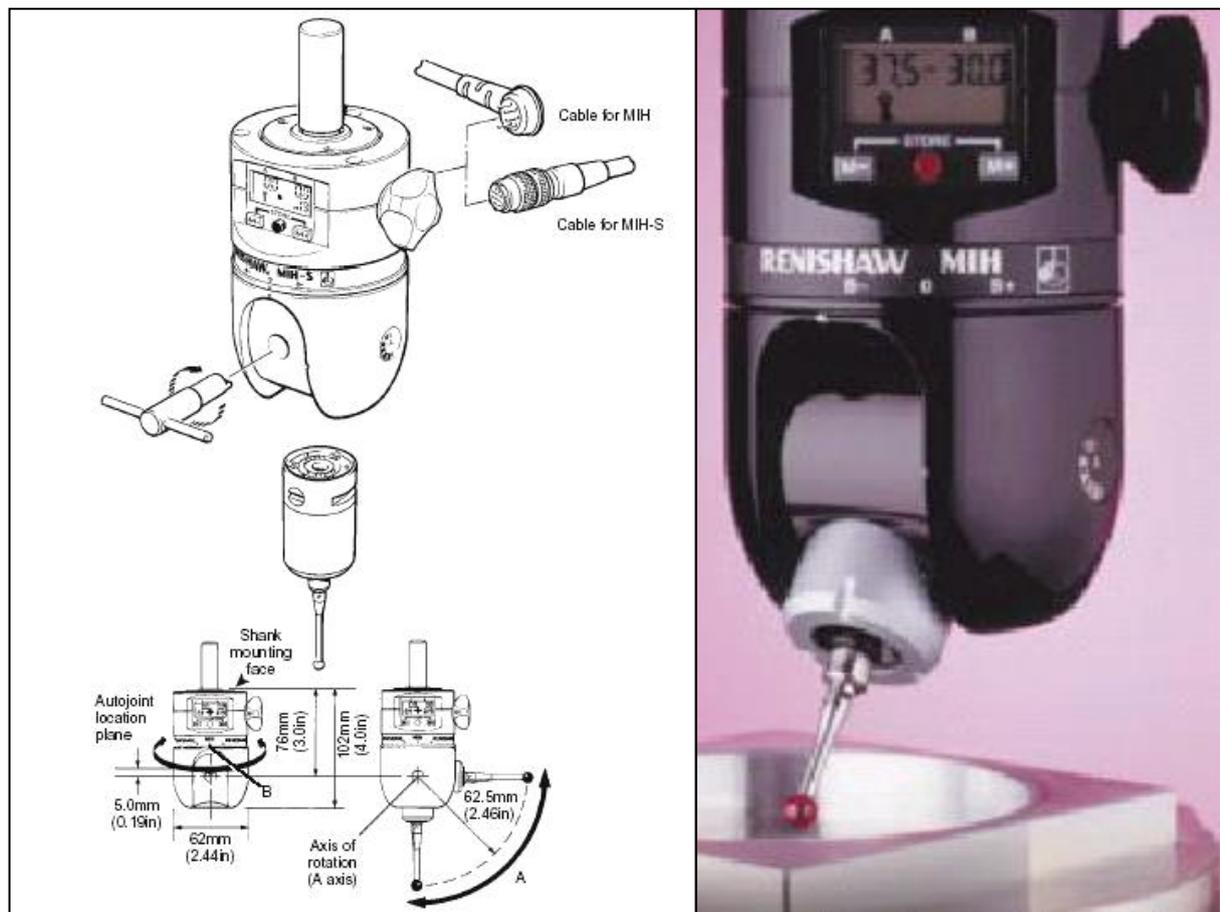


Рис. 7.72. Ручные головки датчиков для КИМ мод. МИН и МИН – S

Таблица 7.11 – Технические характеристики головок МИН и МИН-S

Характеристика	Головки датчиков МИН и МИН-S
Крепление датчика	Высокоточное кинематическое соединение
Индикация статуса датчика	Светодиод
Соединительный кабель	МИН – 5-pin DIN socket МИН-S – 12-pin Hirose
Индикация по осям	
- A	15 положений: 0° – 105° с шагом 7,5°
- B	25 положений: 180° с шагом 7,5°
Вес	580 г
Повторяемость позиционирования	1 мкм (датчик TP6A, щуп – 21 мм)
Максимальный удлинительный элемент	300 мм с датчиками TP2/TP200
Максимально-допустимый крутящий момент	0,45 Нм
Совместимый интерфейс	МИН – PI 4-2, PI 200, PI 7-2 МИН-S – МИН-SI (RS-232C)



Рис. 7.73. Ручная головка МН8

Ручная головка мод. МН8 – компактная поворотная головка датчика, разработанная для оснащения малогабаритных ручных КИМ (рис. 7.73):

- универсальное крепление контактных датчиков (резьба М8);
- 168 настраиваемых фиксированных положений

Технические характеристики головки при-

ведены на рисунке 7.74 и в таблице 7.12.

Ручные фиксированные головки мод. РН6 и РН6М – компактные вертикальные головки датчиков (рис 7.75). Модель РН6 имеет резьбовое крепление М8 для установки контактных датчиков, в отличие от РН6М, конструкция которого обеспечивает соединение датчика посредством высокоточного кинематического сочленения.

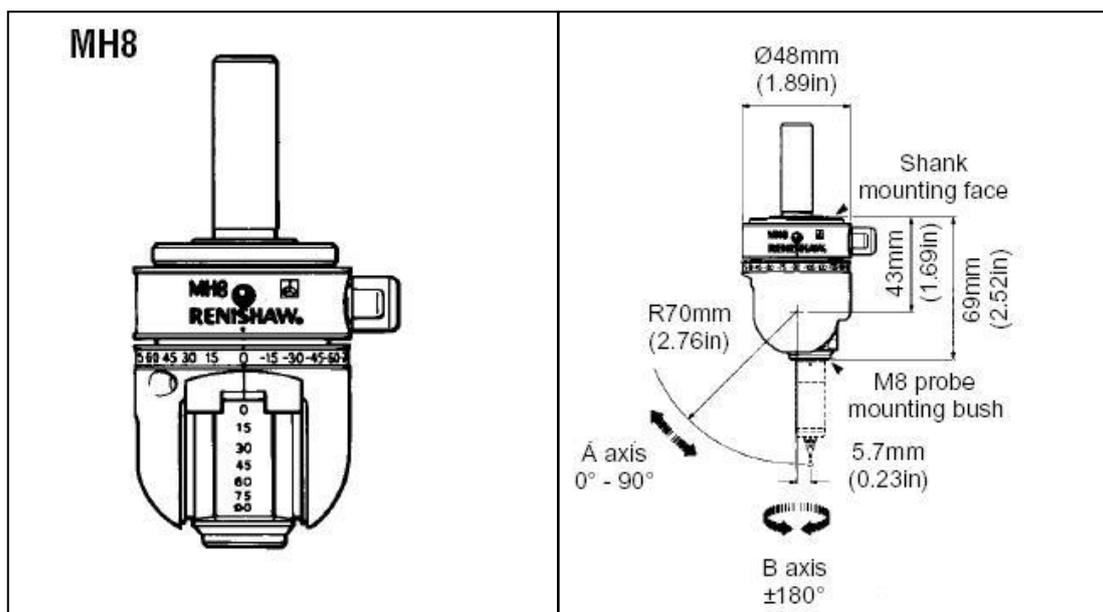


Рис. 7.74. Геометрические характеристики головки МН8

Таблица 7.12 – Технические характеристики головки МН8

Характеристика	Головка датчиков МН8
Крепление датчика	Резьбовое соединение М8
Индикация статуса датчика	1 светодиод
Соединительный кабель	МИН –5-pin DIN socket
Индексация по осям	

- А	7 положений: 0° – 90° с шагом 15°
- В	13 положений: 180° с шагом 15°
Вес	205 г
Повторяемость позиционирования	1,5 мкм (датчик TP2, щуп – 10мм)
Максимальный удлинительный элемент	50 мм (PEL1)

Таблица 7.13 – Технические характеристики головок РН6 и РН6М.

Характеристика	РН6	РН6М
Число посадочных мест под датчик	1	
Индикация статуса датчика	1 светодиод	
Соединительный кабель	Интегрированный	Micro 'D'- разъем
Вес (без кабеля и хвостовика)	48 г	160 г
Повторяемость позиционирования	–	1 мкм (кин. сочленение)

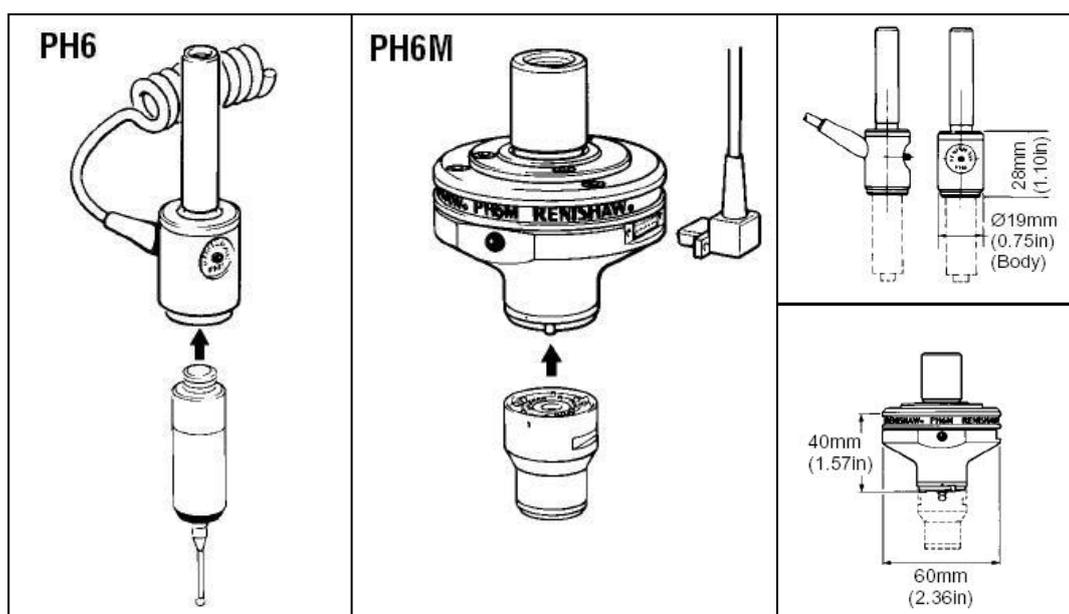


Рис. 7.75. Геометрические характеристики головок РН6 и РН6М

Ручные головки мод. РН1, РН5 (РН5/1) – маленькие головки датчиков с хвостовиком для непосредственного крепления в шпинделе КИМ (рис. 7.76).

Модель РН1: регулируемое положение датчика по двум осям; резьбовое крепление М8 для одного датчика.

Модель РН5: 5 посадочных мест (М8) для одновременного использования пяти датчиков (кроме TP7М или TP200).

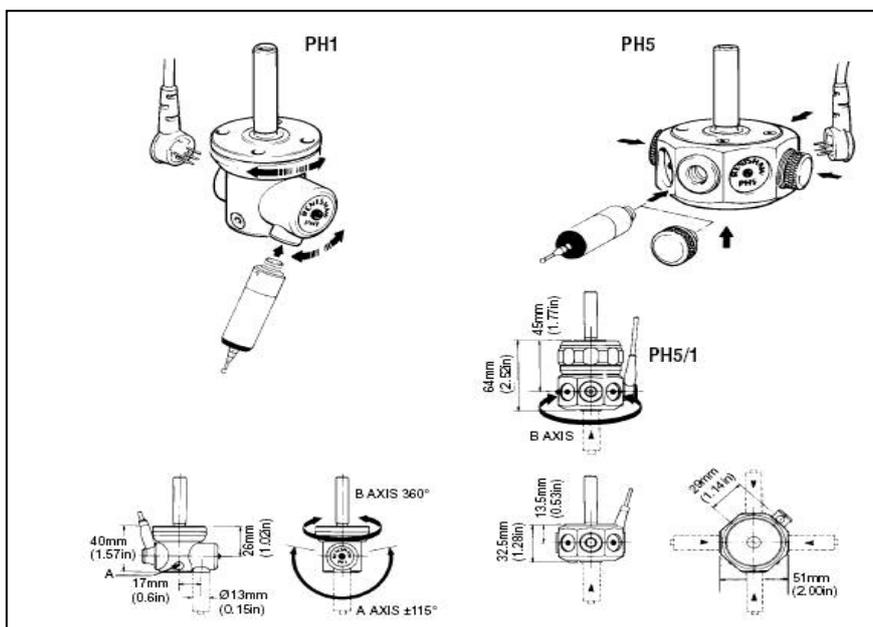


Рис. 7.76. Геометрические характеристики головок PH1 и PH5

Таблица 7.14 – Технические характеристики головок PH1, PH5, PH5/1

Характеристика	PH1	PH5	PH5/1
Число посадочных мест под датчик	1	5	5
Индикация статуса датчика	1 светодиод	2 светодиода	2 светодиода
Соединительный кабель	5-pin DIN 180° socket		
Индексация по осям	Шарнир на 115°, 360° с шагом 15°	нет	нет
- А			
- В	нет	360° с шагом 15°	
Вес (без кабеля и хвостовика)	125 г	184 г	290 г

Головки датчиков с электроприводом. Головки с электроприводом максимально повышают эффективность измерений и позволяют работать на трехкоординатных КИМ в режиме пятикоординатной машины:

- устройства обеспечивают быструю автоматическую индексацию без необходимости повторной калибровки;
- головка с сервоприводом PH51 имеет конструкцию, обеспечивающую установочные смещения по двум осям и поворот на 360°, и предназначена для измерения параметров крупногабаритных заготовок на горизонтальных КИМ;
- совместно с головками могут использоваться системы автоматической

смены инструмента, позволяющие производить замену датчиков не выходя из цикла работы.

Головки с электроприводом мод. PH9 и PH9A представлены на рис. 7.77. Технические характеристики головок приведены в табл. 7.15.

Головки мод. PH10M, PH10MQ, PH10MQH представлены на рис. 7.78. Технические характеристики головок приведены в табл. 7.16.

Головка мод. PH10T – поворотная головка датчика с электроприводом, по техническим характеристикам полностью совпадающая с мод. PH10M, за исключением типа крепления датчика. Головка PH10T имеет резьбовое посадочное место датчика, с резьбой M8.

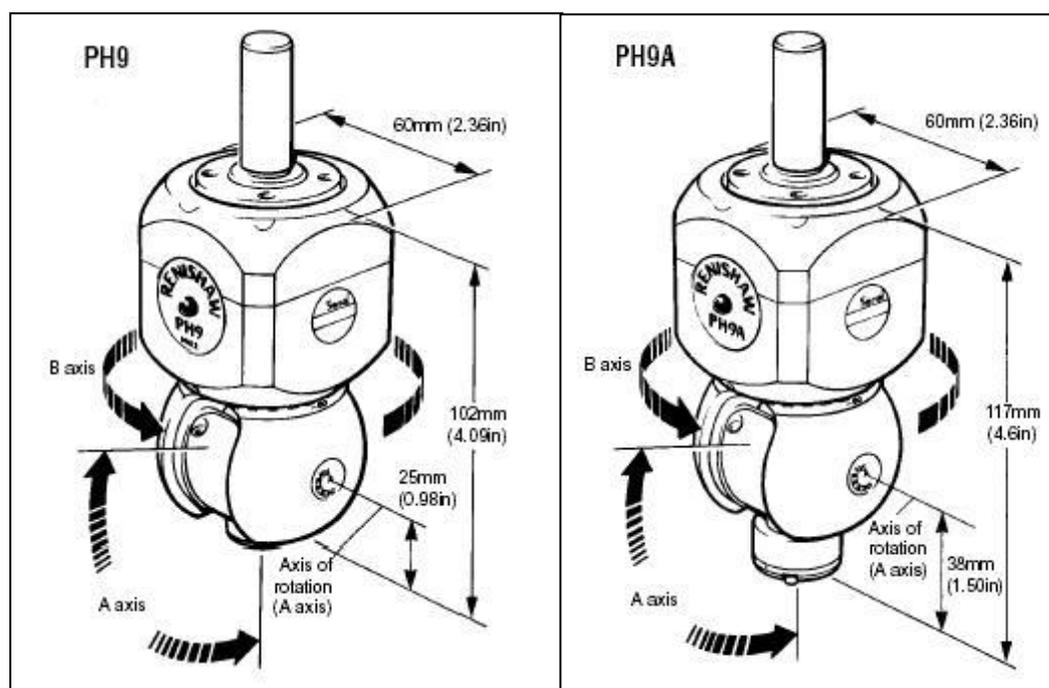


Рис. 7.77. Головки датчиков мод. PH9 и PH9A

Таблица 7.15 – Технические характеристики головок PH9 и PH9A.

Характеристика	PH9	PH9A
Повторяемость позиционирования (при $t^{\circ}=\text{const}$)	0,5 мкм (датчик TP2, щуп – PS1R)	0,5 мкм (датчик TP6A, щуп – PS1-11R)
Время цикла		
- шаг 7,5°		2,5 с
- max 90°		3,5 с
Диапазон индексации по осям		
- A		0° – 105° с шагом 7,5°
- B		±180° с шагом 7,5°
Общее число положений		720

Максимальный круг. момент	0,14 Нм	
Мах удлинит. элемент (с датчиками TR2/TR200)	200 мм (PEL3)	140 мм (PAA2)
Метод крепления головки к КИМ	Хвостовик	
Вес (без хвостовика)	645 г	660 г
Рабочая температура	10 – 40 °С	
Крепление датчика	Резьба М8	Кинематическое сочленение
Тип контроллера головки	PHC9	

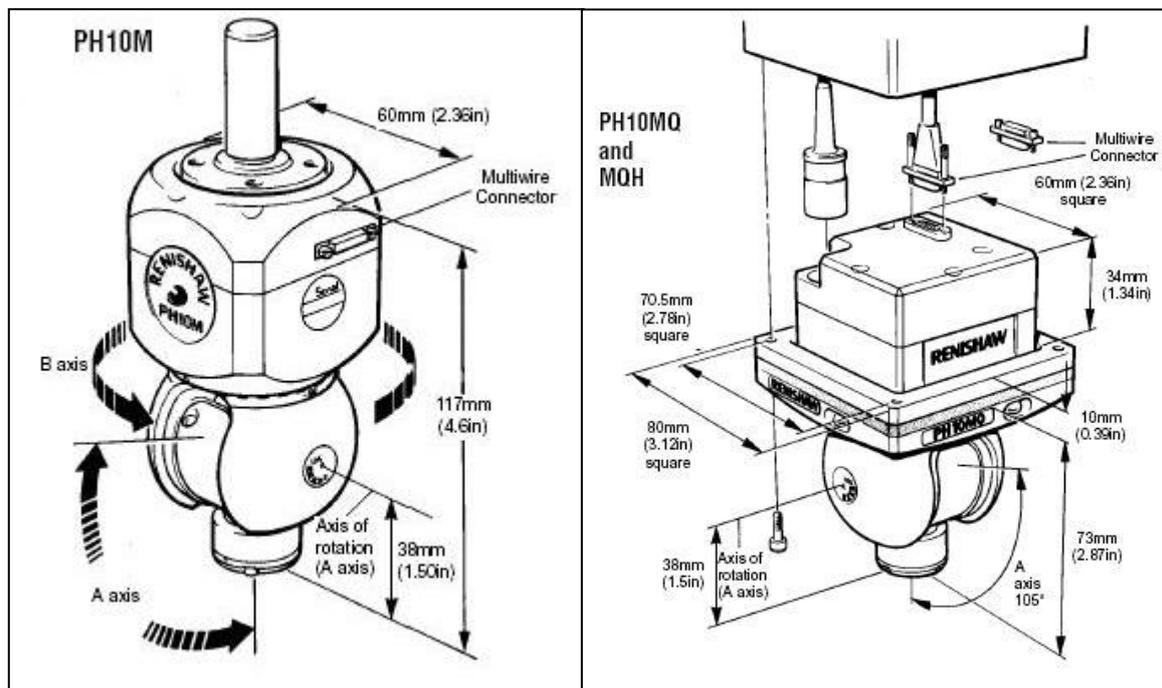


Рис. 7.78. Головки датчиков мод. PH10M, PH10MQ, PH10MQH

Таблица 7.16 – Технические характеристики головок PH10M, PH10MQ (MQH)

Характеристика	PH10M	PH10MQ (MQH)
Повторяемость позиционирования (при $t^{\circ}=\text{const}$)	0,5 мкм (датчик TR2, щуп – 48 мм)	
Время цикла		
- шаг 7,5°		2,5 с
- max 90°		3,5 с
Диапазон индексации по осям		
- A		0° – 105° с шагом 7,5°
- B		±180° с шагом 7,5°
Общее число положений		720
Максимальный круг. момент	0,45 Нм	
Мах удлинит. элемент (с датчиками TR2/TR200)	300 мм (PAA3)	
Метод крепления головки к КИМ	Хвостовик	Непосредственно к шпинделю КИМ
Вес (без хвостовика)	645 г	730 г
Рабочая температура	10 – 40 °С	
Крепление датчика	Кинематическое сочленение	
Тип контроллера головки	PHC10-2	

7.10. Программное обеспечение КИМ

Базовая часть КИМ вместе с системой ее управления обеспечивают определение координат положения любых точек поверхности деталей в пространстве измерений КИМ. Таким образом, непосредственно с помощью КИМ можно измерить лишь расстояния по направлению координатных осей и абсолютное или относительное положение отдельных физических точек поверхности. Все более сложные метрологические параметры (размеры, положения, направления и отклонения формы поверхностей и т.д.) деталей произвольной формы могут быть определены лишь с помощью математических расчетов, использованием алгебраических и тригонометрических функций, векторной и линейной алгебры и др. Осуществлять такие расчеты в темпе выполнения измерений (в реальном времени) возможно только автоматически – с помощью современных ЭВМ и специального программного обеспечения. В общем случае программы измерений на КИМ могут разрабатываться различными методами в зависимости от содержания и способа представления данных об измеряемом объекте и условий выполнения измерений.

На современном этапе автоматизации широкое распространение получили системы непосредственного программирования КИМ, обеспечивающие максимальную оперативность, наглядность и сравнительно небольшую стоимость разработки, имитационной отработки программ и выполнения измерений. Повышению оперативности и упрощению программирования в большей степени способствуют системы оперативного программирования, облегчающие составление программы для автоматического измерения по данным ручного измерения образца детали с применением максимально упрощенной или очевидной символики обозначений программируемых и выполняемых операций языка системы и диалогового режима обмена информацией между оператором и ЭВМ.

Автономные системы непосредственного программирования позволяют подготавливать программы измерений без непосредственного использования КИМ, по чертежам детали. Имея более ограниченный состав операций, чем

проблемно-ориентированные системы, системы непосредственного автономного программирования, однако, позволяют полностью учесть все особенности и возможности данной КИМ, что обуславливает их высокую эффективность.

Существует определяемое сферой применения подразделение программно-математического обеспечения КИМ на взаимосвязанные подсистемы. Все КИМ универсального назначения включают программно-математическое обеспечение для двух- и трехмерного измерения корпусных деталей, которые характеризуют произвольное сочетание элементарных геометрических поверхностей. Другой тип ПМО обеспечивает проведения размерного инспектирования и сканирования сложных 3D – поверхностей, определяемых положением множества точек или аналитической функцией.

В качестве примера ПМО высокого уровня рассмотрим некоторые возможности программного пакета PC – DMIS.

PC-DMIS™ for WINDOWS представляет собой интерактивное графическое программное обеспечение, способное работать практически с любыми КИМ и системами CAD, имеющимися на рынке. Программное обеспечение специально разработано для использования цеховым персоналом с минимальной подготовкой.

PC-DMIS имеет широкие возможности, включая:

- полную совместимость с операционной системой WINDOWS;
- уникальное интерактивное 3D-графическое ядро;
- мощные встроенные средства оформления графического протокола измерений (рис 7.79);
- компьютерное моделирование КИМ для программирования off-line;
- автоматическое присваивание идентификаторов измеренным элементам;
- встроенные средства двусторонней связи КИМ с любыми CAD-системами через форматы IGES, DXF или DMIS;

- работу с 2D – 3D, каркасными или поверхностными моделями CAD;
- опцию Curves and Surfaces для измерения, анализа, а также построения математических моделей (Reverse Engineering) кривых, контуров и поверхностей;
- возможность установки опций для непосредственного обмена данными с популярными CAD – системами (Unigraphics, Pro-Engineer, Catia, ACES).

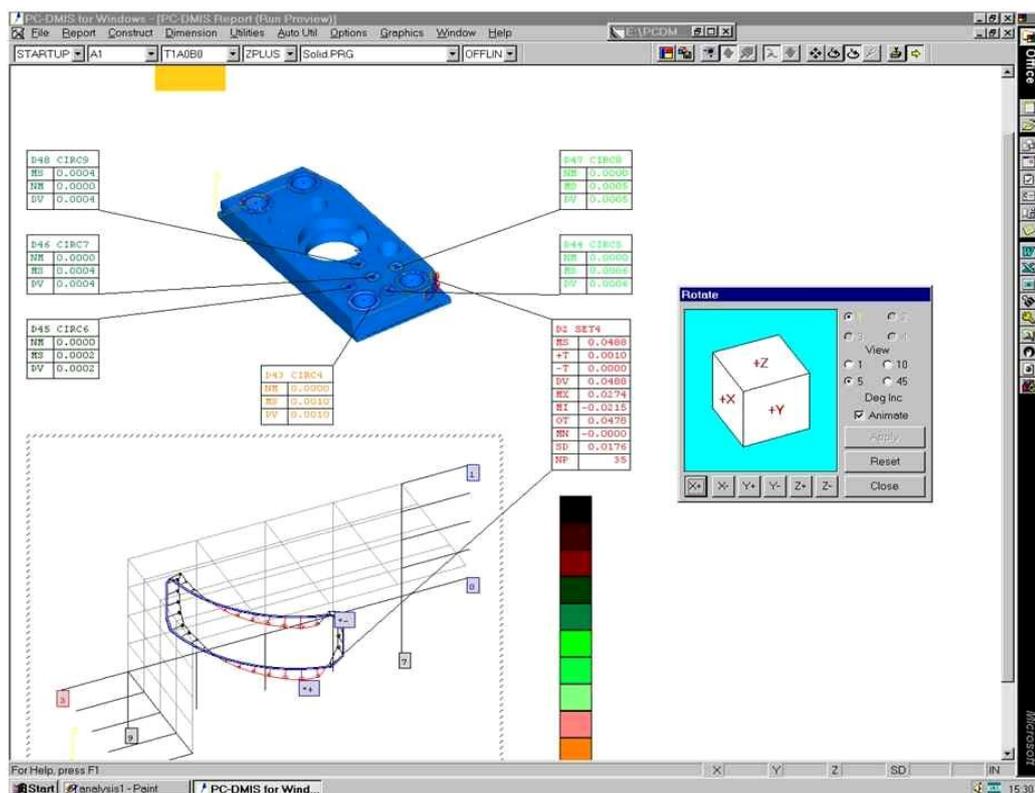


Рис. 7.79. Элементы интерфейса пакета PC – DMIS

PC – DMIS имеет уникальную структуру базы данных, непрерывно управляющую процессом измерения. Оператор может легко переходить от режима составления программы методом обучения к редактированию или к режиму выполнения программы; быстро преобразовывать программу из работы в ручном режиме к автоматическому режиму; изменять структуру программы, добавляя точки измерения и точки подвода, отмечая их курсором мыши на CAD-изображении детали.

PC-DMIS™ for WINDOWS позволяет оператору использовать точность и всю информацию первичной CAD – модели (описание поверхностей, их геометрию, номинальные значения размеров, векторы нормалей и т.д.) для создания измерительных программ методами on-line и/или off-line, а также для графического моделирования (и отладки) процесса измерения по математической модели. Вместо ручного ввода номинальных значений с чертежа PC – DMIS позволяет выбрать элемент с CAD – модели при помощи курсора мыши.

При выборе элемента вместе с ним считывается соответствующая номинальная размерная информация и генерируются команды для КИМ. Моделирование позволяет оператору найти и отладить ошибки в программе, не запуская ее на КИМ.

Масштабное движущееся изображение щупа также указывает оператору (в ручном режиме работы) места, где должны быть измерены точки (рис. 7.80).

Функции измерения и программирования PC – DMIS. При помощи PC – DMIS, оператор КИМ может создать и отладить программу измерений для новой детали за короткое время.

Время программирования и измерения минимизируется за счет использования широкого набора специальных функций, повышающих производительность процессов программирования измерений.

PC – DMIS использует интерактивное графическое отображение процесса для упрощения процессов программирования и соответствующего измерения.

Основными функциями работы с экраным изображением модели являются:

- Scale Drawing (Масштабирование изображения) – Scale to fit (Автомасштабирование) – Zoom (Увеличение) – Multiple views 2D/3D rotations (Поворот изображений 2D/3D) – Shading (Полутеневое изображение поверхностей);

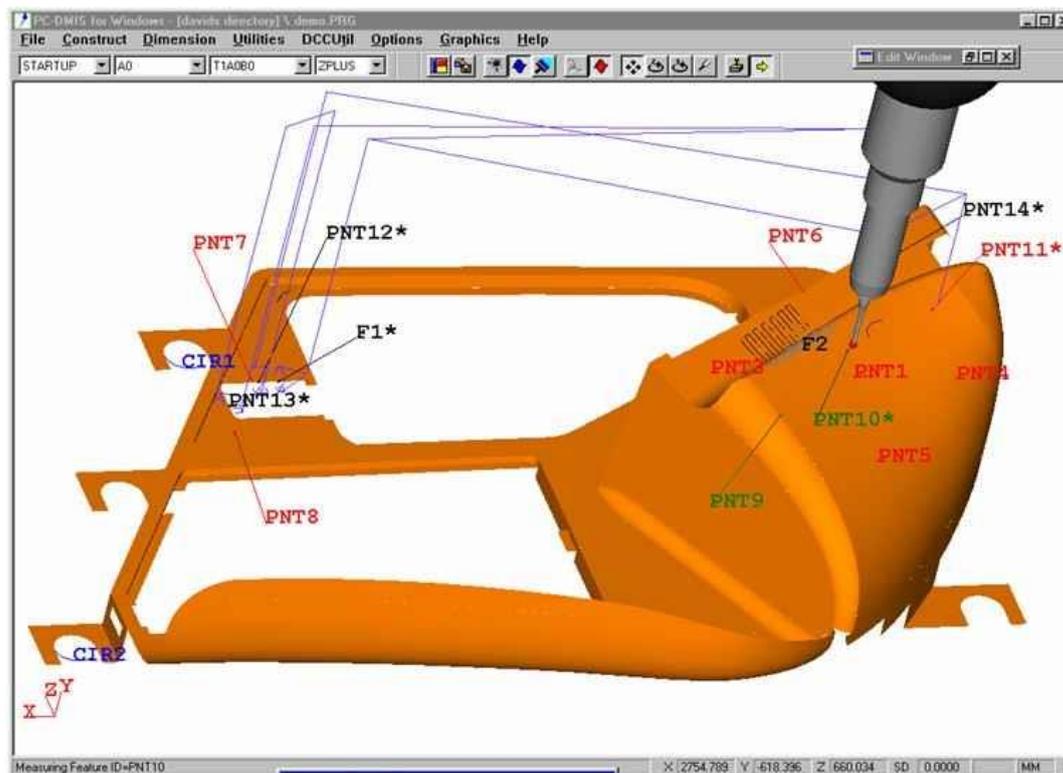


Рис. 7.80. Имитационное слежение работы КИМ программой

- Perspectives (Изображение в аксонометрической проекции) – Move with mouse (Сдвиг изображения курсором мыши) – Shrink / Enlarge (Уменьшение / Увеличение изображения).

Специализированные графические функции, ориентированные на решение метрологических задач:

- Delete CAD (Удаление модели CAD)/ Delete Features (Удаление геометрических элементов): возможность упрощения импортируемого CAD – файла перед включением его в измерительную программу;
- Mirror CAD (Зеркальное отображение CAD – модели), Screen Capture (Копирование и вставка изображения через буфер обмена), Edit CAD (Редактирование модели CAD) / Edit Feature (Редактирование геометрических элементов) – позволяет оператору редактировать параметры графического изображения импортированной CAD – модели (например, цвет);
- Edit Dimension Info (Редактирование размерной информации) – позволяет

добавлять форматированную информацию к графическому изображению в выходном протоколе измерения, возможен вывод следующих параметров: Отклонение, Макс. / Мин. значение, Вне допуска, Среднее значение, Среднее квадратическое отклонение, Число точек;

- Edit Dimension colour (Редактирование цвета размерной информации) – устанавливает цвет вывода графического изображения измеренных размеров;
- Make CAD 3D (Преобразование CAD в 3D – формат) – позволяет работать с 2D CAD изображениями в трехмерном пространстве;
- CAD Info (Вывод информации о CAD-модели) – позволяет выводить информацию, связанную с любым элементом CAD модели;
- Display / Animate Probe Path (Просмотр траектории щупа) – эта функция позволяет оператору выводить изображение траектории движения измерительного щупа, соответствующего текущей измерительной программе.

PC DMIS также включает множество функций для решения ряда нижеуказанных задач:

- расширенные функции PC DMIS для измерения и программирования;
- контроль детали без использования CAD – модели;
- контроль деталей, изготовленных из тонкого листового металла (рис. 7.81);
- сканирование различного типа;
- контроль кривых и сложных поверхностей;
- автоматическая прорисовка детали в процессе измерения.
- *Функции самообучения в PC-DMIS.* Одной из особенностей PC-DMIS является функция самообучения, позволяющая создавать программу измерения детали на КИМ без использования CAD – файла.
- Используя графический интерфейс, оператор просто касается щупом геометрического элемента на детали и PC-DMIS не только определяет геометрические параметры элемента, но и строит его графическое изображение.

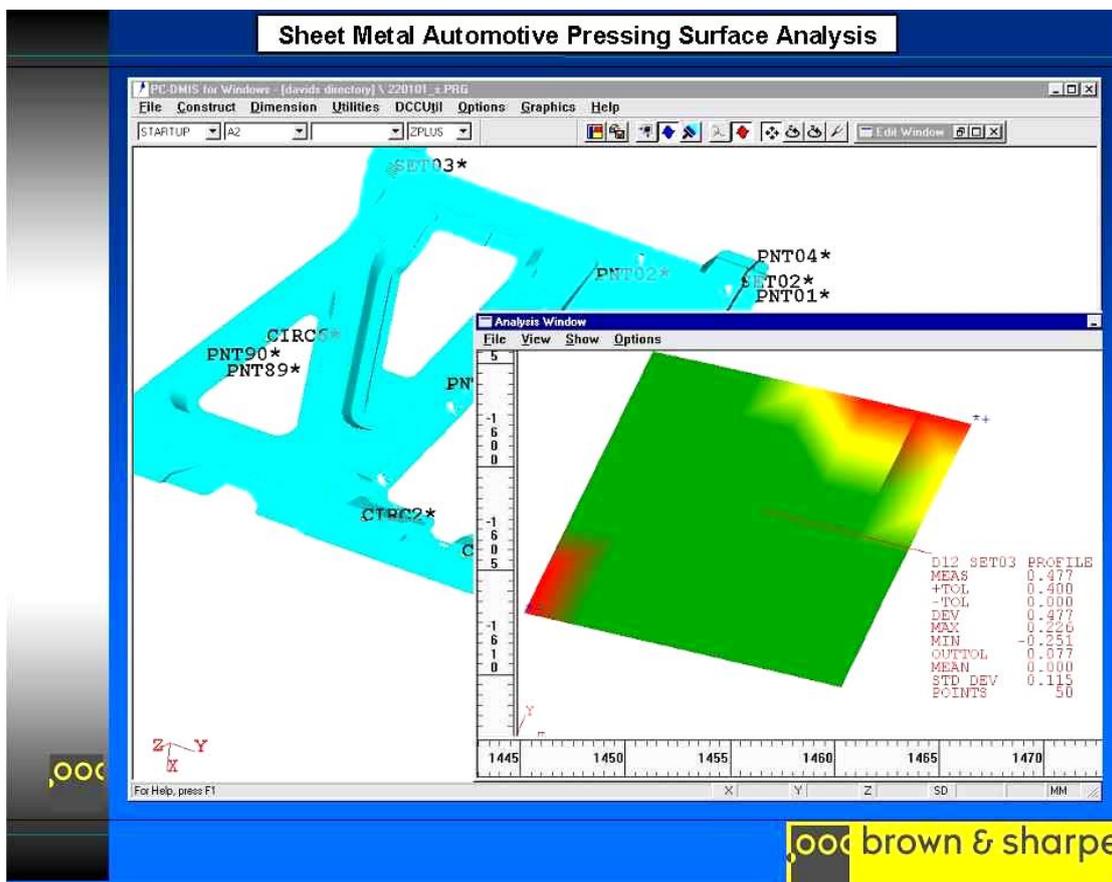


Рис. 7.81. Размерное инспектирование деталей из листового металла

Одной из уникальных функций PC – DMIS является его способность автоматически распознавать тип измеренного элемента (прямая, окружность, цилиндр и т.д.), используя набор измеренных точек касания, при этом минимизируется количество информации, вводимой оператором. По завершении измерения элемента PCDMIS автоматически выдает тип измеренного элемента с его геометрическими характеристиками и прорисовывает его изображение на экране.

Опция Curves and Surfaces. С помощью мощной опции CURVES and SURFACES для PC-DMIS for WINDOWS оператор может производить оперативный анализ 3D – кривых и сложных поверхностей на КИМ. Это может осуществляться путем простого выбора измеряемого элемента с экрана. Опция Curves and Surfaces использует стандартные графические форматы (IGES, DMIS и т.д.) для создания измерительных программ деталей, используя 3D – профили. Это позволяет контролировать турбинные лопатки, штам-

пы и другие модели произвольного профиля как в автоматическом, так и в ручном режиме.

Опция CURVES and SURFACES позволяет оператору импортировать CAD – модель 3D – детали в измерительную программу. Затем PC – DMIS автоматически извлекает из модели номинальные координаты точек и их номинальные направляющие векторы, используя математическое описание поверхности, заданное в CAD – модели. Программное обеспечение использует эти номинальные значения для подвода щупа по нормали к поверхности детали (при измерении в автоматическом режиме). Для ручных КИМ программа производит точную математическую компенсацию радиуса наконечника измерительного щупа, используя номинальное значение вектора нормали в точке касания.

Программирование. При создании программы измерения возможны несколько подходов:

- самообучение (программирование по первому циклу);
- программирование On Line (с использованием КИМ и выбором измеряемого элемента с экрана компьютера);
- программирование Off Line (без использования КИМ).

При подобном визуальном программировании для отладки программы используется компьютерное моделирование процесса измерения с использованием графического изображения движения измерительного щупа (рис. 7.81).

Функции сканирования и оцифровки поверхностей детали. PC-DMIS позволяет реализовать так называемую оцифровку сложных 3D – поверхностей («Reverse Engineering») с помощью операции сканирования, с последующим созданием их математических моделей. Эта информация может быть использована CAD – системой для сравнения измеренных данных с номинальными (рис. 7.82).

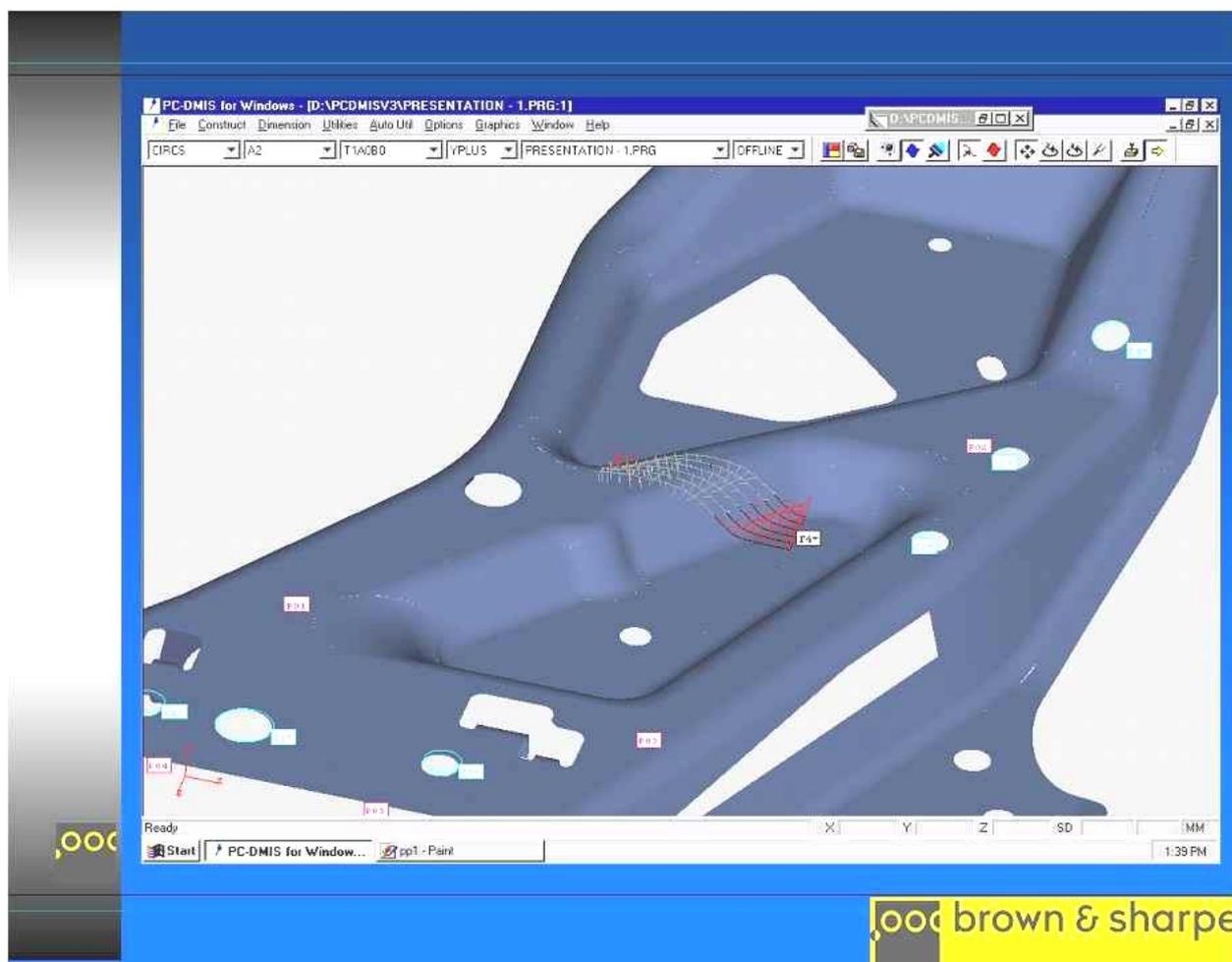


Рис. 7.82. Результаты оцифровки сложной трехмерной поверхности

Данная функция отличается крайней простотой и удобством использования, наряду с точностью и мощностью алгоритма.

Помимо описанного программного обеспечения существует и ряд других пакетов, обладающих, как и PC – DMIS, модульной структурой, решающих задачи размерного инспектирования, сканирования и оцифровки поверхностей любой сложности, основными из которых являются:

QUINDOS – мощный программный пакет, обладающий широкими возможностями, гибкостью и простотой эксплуатации. Благодаря доступному графическому интерфейсу пользователя, работать с ПО может практически любой инженер, независимо от профессиональных навыков.

Структурированные базы данных QUINDOS обеспечивают быстрый доступ ко всей необходимой информации в любое время.

ПО работает под последними версиями ОС MS Windows (2000 XP) и позволяет управлять работой КИМ не только производства компании DEА, но и большим числом машин других производителей, ровно, как и установками для контроля круглости, измерения параметров коленчатых валов и др.

При использовании на производстве может легко встраиваться в автоматизированную систему управления гибкой производственной системой.

Более 30 специальных подпрограмм, которые могут быть дополнительно интегрированы в пакет, позволят максимально продуктивно использовать возможности оборудования.

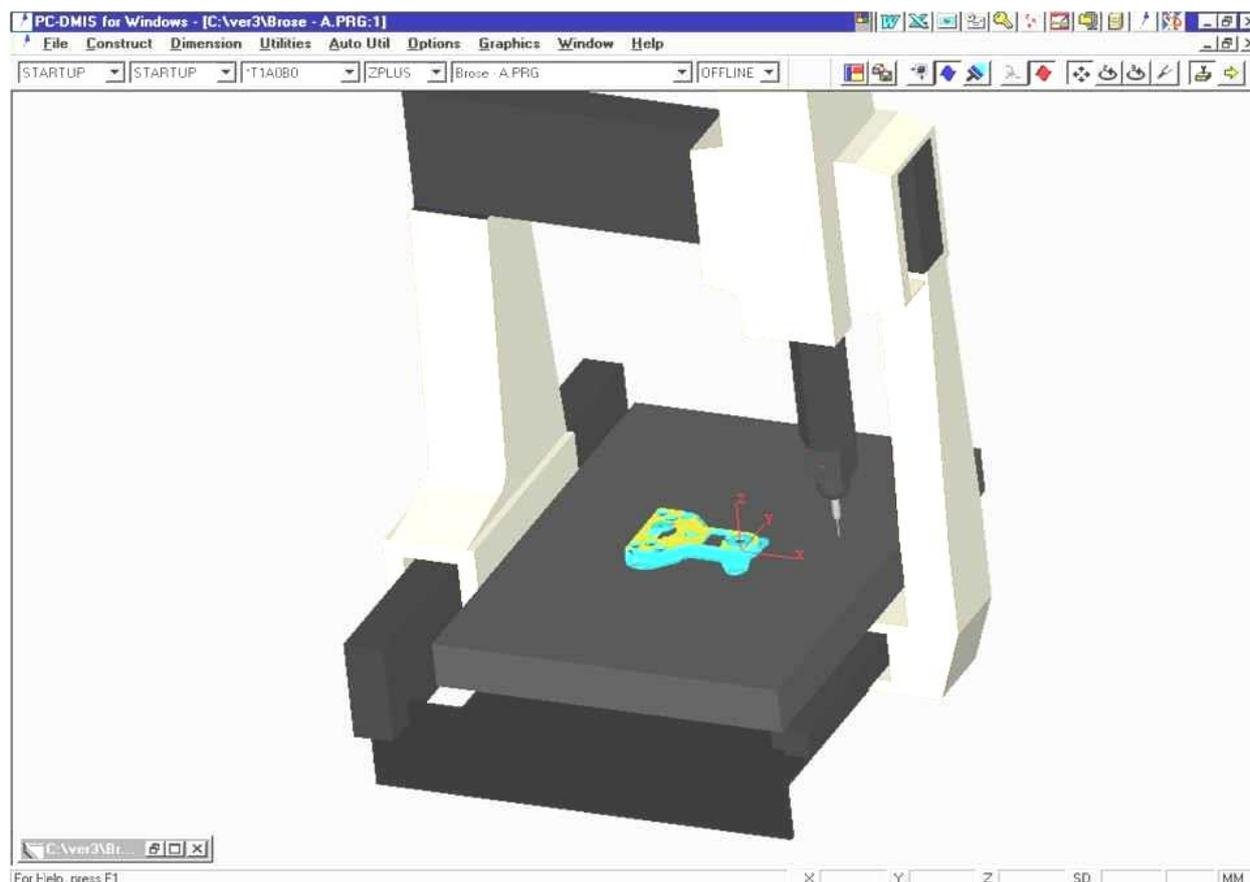


Рис. 7.83. Визуализация программирования КИМ

CHORUS NT – сочетает в себе многофункциональность, простоту в использовании и позволяет решить большинство комплексных метрологических задач.

Программа может быть интегрирована как в отдельные АСУ ТП, так и в центральную информационную систему завода.

Все функции CHORUS NT легко доступны посредством удобного графического интерфейса пользователя, отвечающего мировым стандартам SOI (Standard Operator Interface).

В ПО CHORUS NT используется стандартный язык программирования КИМ, программы на котором применимы для большинства машин лидирующих мировых производителей.

Ниже приведены лишь некоторые характеристики и доступные функции CHORUS NT:

- дружественный мнемонический графический интерфейс, соответствующий стандарту SOI;
- процедуры и функции автоматической идентификации позиционирования (опция);
- возможность пополнения библиотеки процедур собственными циклами;
- алгоритмы вычисления многих параметров;
- автоматическая процедура создания зеркального контура относительно любой оси;
- создание зеркального контура в диалоговом режиме;
- автоматическое управление, синхронизация, имитационная обработка управляющей программы и устранение возможных проблем (например, столкновения манипуляторов двухстоечных КИМ и др.).

Прямой САПР-интерфейс DMIS (DMIS 3.0 и 2.1):

- платформа DMIS дает уникальные возможности, облегчающие процедуры программирования и редактирования при создании УП для КИМ;
- обучающий режим DMIS позволяет пользователю наиболее эффективно и быстро ознакомиться с возможностями системы;
- автоматизированный и диалоговый режимы редактирования;
- УП может быть скорректирована в любое время в течение обработки;
- УП может быть запущена, прервана остановлена на любой ста-

дии. Возможен режим покадровой отработки программы;

- имитация отработки УП на КИМ, без наличия рабочего образца, в автоматическом и диалоговом режиме;
- формат выходных данных DMIS универсален для большинства CAD-систем.

Применение ПО для двухстоечных КИМ:

- индивидуальное составление частей программы для одновременной работы двух манипуляторов двухстоечных КИМ;
- нет необходимости в синхронизации управляющей программы вручную – ПО выполняет ее автоматически, предупреждая столкновения манипуляторов;
- автоматическая оптимизация УП для сокращения времени простоя одного из манипуляторов в режиме параллельной работы;
- возможность одновременного независимого применения каждого манипулятора.

CHORUS CAD – пакет, состоящий из четырех независимых модулей. При установке можно инсталлировать данные модули по отдельности.

1) CHORUS CAD VERIFY – интерактивное графическое измерительное ПО, разработанное для работы под ОС MS Windows для решения задач управления системами контроля и измерения сложных поверхностей.

Система позволяет импортировать математические модели широкого спектра CAD – систем и решает следующие задачи:

- автоматическое определение геометрических характеристик CAD-файла;
- проведение технологического анализа модели по исходному CAD-чертежу для составления алгоритма измерения;
- автоматический выбор сенсора, характеристики которого отвечают поставленной измерительной задаче;
- разбивка модели на простые трехмерные геометрические составляющие;

- подготовка алгоритма измерений (определение базовых точек, наложение координатных сеток и др.);
- графическое представление результатов измерений, что существенно облегчает их анализ.

Мощные возможности ПО позволяют создавать управляющие программы для различных моделей КИМ. При этом CHORUS CAD позволяет имитировать работу конкретной модели КИМ и провести инспекционный контроль детали с теми настройками и тем инструментом, который Вы укажете. Такой виртуальный тест управляющей программы позволяет оператору оптимизировать цикл, выбрать необходимое инструментальное обеспечение без непосредственного наличия КИМ и рабочего образца, что существенно экономит время и средства.

2) CHORUS CAD NUVOLA VERIFY Данный модуль позволяет осуществить автономный метрологический анализ деталей, основанный на данных, полученных с КИМ DEA или систем размерного контроля, дигитализации и сканирования других производителей. Графические возможности высокого уровня позволяют провести высококачественный метрологический анализ деталей, исследовать на соответствие математическую модель и модель, полученную в результате дигитализации.

3) CHORUS CAD NUVOLA REV ENG предлагает все средства, необходимые для фильтрации, редактирования и генерирования сложных поверхностей по массивам точек, полученных с КИМ. Таким образом, имея результаты сканирования детали координатно-измерительной машиной, оператор имеет возможность воссоздания математической модели детали в соответствии с алгоритмами NURBS.

4) CHORUS CAD REV ENG – интерактивный модуль для систем точечного обмера. Предлагает средства для ускорения, облегчения и увеличения точности математического моделирования и анализа сложных трехмерных поверхностей. Позволяет определить математическую модель как совокупность геометрических 3D-фигур и поверхностей по аналогии с CAD-

системами. Эти приемы существенно сокращают время между этапами разработки и началом массового производства детали.

Все измерительные задачи математического моделирования и контроля автоматически решаются программным обеспечением CHORUS CAD. Такие функции системы, как размерный анализ и анализ Гаусса делают возможной оценку качества генерируемой поверхности в реальном времени.

Полученная математическая модель может экспортироваться в форматы IGES и VDA. Функции CAD-программ, используемые в CHORUS CAD, позволяют оптимизировать математическую модель перед генерацией на ее основе управляющей программы для станка с ЧПУ CAD/CAM системой.

Вопросы для самоподготовки

1. Чем обусловлено применение современных средств измерения?
2. Опишите устройство и принципы действия КИМ.
3. Опишите основные методы координатных измерений.
4. Дайте классификацию измерительных преобразователей.
5. Опишите модель механизма образования погрешности.
6. Опишите модель оценки точности механической обработки резанием.
7. Дайте трактовку математической модели и обобщенной структурной схемы измерительного преобразователя и измерительного прибора.
8. Опишите синтез измерительных приборов с уравниванием механических сил и моментов.
9. Опишите динамические свойства измерительных преобразователей и приборов.
10. Как осуществляется коррекция динамических характеристик измерительных преобразователей?
11. Опишите синтез измерительных приборов с уравниванием электрических величин.
12. Опишите синтез компенсаторов постоянного напряжения.
13. Опишите синтез компенсаторов переменного напряжения.

14. Опишите синтез измерительных мостов.
15. Опишите синтез цифровых измерительных приборов.
16. Опишите предпосылки применения микропроцессоров в измерительных приборах.
17. Опишите конструкцию базовой части КИМ и ее функциональные параметры.
18. Опишите КИМ портальной компоновки.
19. Опишите КИМ мостовой компоновки.
20. Опишите КИМ консольной компоновки.
21. Опишите КИМ стоечной компоновки.
22. Опишите принципы взаимодействия КИМ с измеряемой деталью.
23. Опишите измерительные системы для КИМ производства компании Renishaw plc (Великобритания).
24. Опишите программное обеспечение КИМ.

Библиография

1. Воробьев В.Г. Авиационные приборы, информационно-измерительные системы и комплексы: учеб. для вузов / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, И.К. Кадышев; под ред. В.Г. Воробьева // – М.:Транспорт, 1992. – 399 с.
2. ГОСТ 18353 – 79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введен в 1980г. – М.: Издательство стандартов, 1980.
3. ГОСТ 24450-80 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. Введен в 1982г. – М.: Издательство стандартов, 1982.
4. Ергучев Л.А. Магнитные методы и средства неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава: пособие / Л.А. Ергучев // – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 90 с.
5. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман // – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

6. Набока Е.В. Фуллерени: фізика, хімія, техніка та застосування: навч. посібник / Е.В. Набока, О.О. Бруяка, Г.И. Костюк // – Х.: Нац. аеро-косм. ун-т «Харьк. авіац. ін-т», 2012. – 188 с.
7. Набока О.В. Збірник задач з курсів основи автоматизованого електроприводу / О.В. Набока, О.Ю. Приходько, О.М. Ушаков // – Збірник задач. НТУ «ХПІ», 2014. – 156 с.
8. Набока О.В. Методичні вказівки до практичних занять «забезпечення точності обробки при дослідженні теплових деформацій та емпіричних характеристик» партії деталей / О.В. Набока, О.Ю. Приходько, О.М. Ушаков // – методичні вказівки, НТУ ХПІ, 2012. – 45 с.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева // – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
10. Палев Б.И. Электрические измерения: справочник (в вопросах и ответах) / Б.И. Палев // – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
11. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева // – М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1 – 488 с.; Кн.2 – 352 с.
12. Сайт: <http://www.hexagonmetrology.com>
13. Сайт: <http://www.hexagonmetrology.us/>
14. Сайт: <http://www.international@renishaw.com>
15. Сайт: <http://www.jenoptik.com/industrial-metrology>
16. Сайт: <http://www.pergam.ru/>
17. Сайт: <http://www.riftek.com>
18. Сайт: <http://www.romer.com/>
19. Сайт: <http://www.standardgage.com/>
20. Фернер В. Пневматические приборы низкого давления / В. Фернер; перевод с немецкого В.И. Дмитриева и Б.С. Шкрабова, под редакцией В.И. Чернышева // – М.: «МИР», 1964. – 317 с.
21. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден // – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каков уровень имитационных исследований, каковы позиции на мировом рынке ИМ?

Безусловно, за последние годы мы существенно отстали. Но, в то же время не настолько и не во всем, чтобы говорить о полной утрате отечественной школы ИМ.

Да, мы почти не принимали участие в большинстве наиболее значимых форумов по ИМ, которых проходит огромное количество по всему миру.

Например, в наиболее значимом мероприятии в мире ИМ Winter Simulation Conference. Нам были недоступны передовые зарубежные разработки и технологии. О нашем существовании на рынке ИМ почти забыли.

Но по собранной нами информации, можно сделать однозначный вывод – многое из того, что было присуще советской школе ИМ, нам удалось сохранить, а в некоторых случаях и приумножить. Благодаря энтузиазму и терпению, удалось сохранить основной костяк специалистов высочайшего уровня, в основном представителей высшей школы. Для примера могу привести целый ряд наиболее известных специалистов, проявивших себя в последние годы:

- в Санкт-Петербурге (профессор Яковлев С.А. – ЛЭТИ, профессор Рыжиков Ю.И. – академия им. Можайского, профессор Варжапетян – ГУАП, доцент Елтышев Б.К. – ГМТУ);
- в Москве (ученый секретарь отделения кибернетики и информационных технологий РАН Власов С.А., профессор Черненький В.М. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор Кудрявцев Е.М. – МИСИ, доцент Лычкина Н.Н. – МУУ);
- в Новосибирске (профессор Родионов С. А. – КТИ ВТ СО РАН, доцент Окольнишников В.В. – КТИ ВТ СО РАН, профессор Цой Е.Б. – НГТУ);
- в Киеве (профессор Томашевсий – НТУ КПИ) и т. д.

Этот список можно продолжать и продолжать. Идеи и мысли, заложенные в труды этих специалистов, представляют значительный интерес и за рубежом.

Вновь в Украине начинают появляться собственные оригинальные системы ИМ. На пример, система ISS 2000 (Томашевский, г. Киев) и т. д.

Конечно, нужно признать, что мы существенно отстаем в технологиях реализации собственных систем. Особенно это очевидно в сравнении с разработками из Германии, США, Израиля и других стран.

За рубежом появилось огромное количество современных систем ИМ.

Наибольший интерес представляют коммерческие симуляторы. Они специализированы для различных отраслей промышленности. Например, eMPlant (машиностроение), DELMIA (судостроение), NETRAC (телекоммуникации и связь) и т. д. Используя данные симуляторы, пользователь не отвлекается на особенности той или иной системы моделирования, а полностью погружается в предметную область. Используя возможности визуального моделирования и современные технологии диалога и анимации, он имеет возможность существенно ускорить процесс исследований.

Идеи, заложенные в наших разработках, не уступают, а в некоторых случаях превосходят зарубежные в научном плане, но уступают в технологиях их реализации.

Будущее в реальных практических исследованиях за специализированными приложениями, идея которых заложена в коммерческих симуляторах.

Конечно, можно их внедрять и использовать. Но, к сожалению, их стоимость (\$100000 и выше) не позволяет этого сделать. Поэтому одной из основных задач в настоящее время является освоение и внедрение подобных технологий. Такие работы начаты, и уже в ближайшее время на нашем рынке могут появиться коммерческие продукты, использующие данные технологии и доступные по цене.

Таким образом, с уверенностью можно сказать, что ИМ на Украине постепенно выходит из кризиса, и скоро мы вновь заговорим о серьезных успехах и достижениях.

Навчальне видання

БЕЛОВОЛ Ганна Володимірівна

КЛОЧКО Олександр Олександрович

НАБОКА Олена Володимірівна

СКОРКІН Антон Олегович

ШЕЛКОВИЙ Олександр Миколайович

Імітаційне моделювання в задачах машинобудівного виробництва

У 2-х томах, том 2.

За редакцією О.М. Шелкового

Навчальний посібник

Роботу до видання рекомендував проф. Крутіков Г.А.

Редактор О.С. Самініна

План 2015 р., поз. 18

Підп. до друку 28.09.2015 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Тираж 300 пр. Зам. №3033.

Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня ДП ХМЗ «ФЕД»

Свідоцтво про державну реєстрацію №23752352 від 23 жовтня 1995р.

61023, Харків, вул. Сумська, 132, тел. +38 (057) 719-67-82

e-mail: alina@tfed.com.ua

