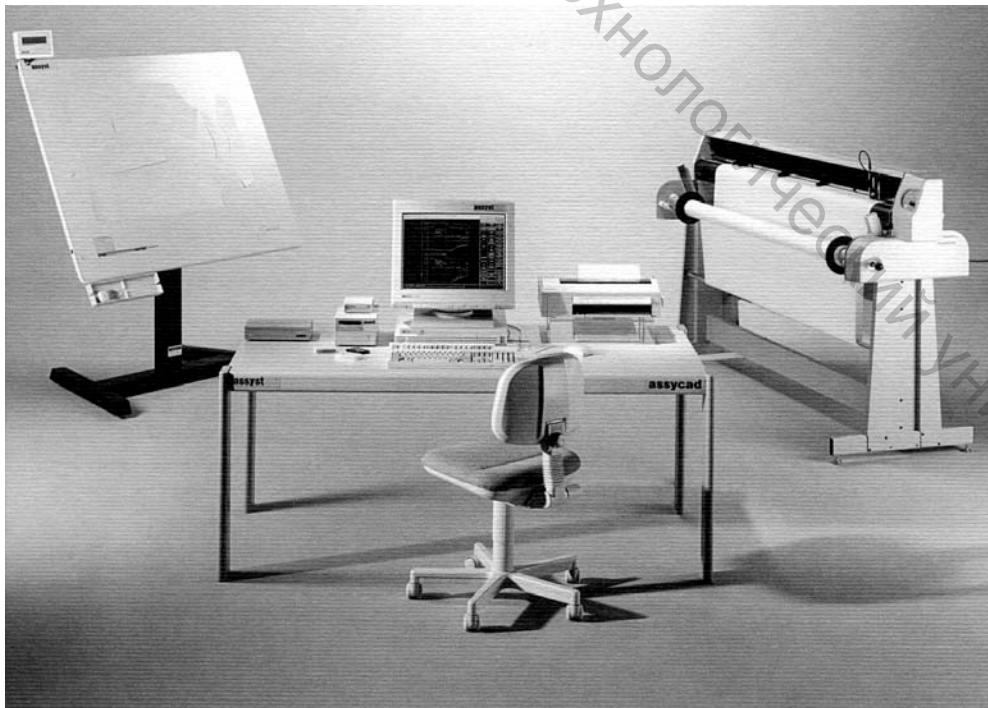


САПР ОБУВИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

для студентов специальности 1-50 02 01 «Конструирование и технология изделий из кожи» специализации 1-50 02 01 03 «Конструирование обуви»
дневной формы обучения



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Учреждение образования
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

А. Л. КОВАЛЕВ

САПР обуви

Курс лекций

**для студентов специальности 1-50 02 01 «Конструирование и технология изделий
из кожи» специализации 1-50 02 01 03 «Конструирование обуви»
дневной формы обучения**

**Витебск
2012**

УДК 687.016:658.011.56
ББК 37.24
А 22

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов легкой промышленности УО «Витебский государственный технологический университет» В. В. Дрюков;
кандидат технических наук, инженер СООО «Викоп Фагус» В.С. Дубовец

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 8 от 30.11.2011.

А22 Ковалев, А. Л. САПР обуви : курс лекций / А. Л. Ковалев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2011. – 119 с.

ISBN 978-985-481-137-6

Курс включает материалы по темам, предусмотренным программой курсов «САПР обуви». Курс лекций предназначен для студентов специальности 1-50 02 01 03 «Конструирование обуви» дневной формы обучения. Издание представляет интерес для студентов, получающих высшее и среднее техническое образование, а также инженерно-технических работников обувной промышленности.

УДК 687.016:658.011.56
ББК 37.24

ISBN 978-985-481-137-6

© Ковалев А.Л., 2012
© УО «ВГТУ», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лекция 1. Использование ЭВМ в обувной промышленности.....	6
Лекция 2. Основные принципы построения САПР обуви.....	10
Лекция 3. Проектирование с помощью ЭВМ.....	13
Лекция 4. Виды обеспечения САПР.....	21
4.1 Методическое обеспечение САПР верха обуви.....	23
4.2 Математическое обеспечение САПР верха обуви.....	25
4.3 Программное обеспечение.....	26
4.4 Информационное обеспечение САПР обуви.....	32
4.5 Лингвистическое обеспечение.....	35
4.6 Техническое обеспечение.....	35
Лекция 5. Обработка геометрических данных. Общие положения.	
Введение в векторную графику.....	41
5.1 Аналитически описываемые геометрические объекты.....	44
Лекция 6. Аналитически не описываемые геометрические объекты.....	55
6.1 Параметрические кривые в форме Фергюсона.....	61
6.2 Кривые, построенные с помощью кубических сплайн- функций.....	62
6.3 Представление кривой по Эрмиту.....	63
6.4 Определение кривой по Безье.....	66
6.5 Кривые, построенные с помощью В-сплайнов.....	68
6.6 Интерполяция кривых методом В-сплайнов.....	71
6.7 Конструирование поверхности по Фергюсону.....	72
6.8 Конструирование поверхностей методом Кунса.....	74
6.9 Конструирование поверхности методом Безье.....	76
6.10 Конструирование поверхности методом В-сплайнов.....	77
Лекция 7. Автоматизированное проектирование обуви.....	78
7.1 Выбор оптимального метода проектирования обуви.....	78
Лекция 8. Аппроксимация контуров детали как способ создания имитаци- онной математической модели объекта.....	81
8.1 Задачи комплексного моделирования деталей обуви.....	83
8.2 Графоаналитическая модель геометрического образа обувной колодки.....	89
8.3 Перспективы получения развертки и проектирования верха обуви на основе 3D поверхности колодки.....	104
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Термин «САПР» является смысловым эквивалентом английского CAD (сокращенное английское Computer-Aided Design) и означает проектирование с помощью ЭВМ. Человеку в этом процессе отводится активная роль, он решает самостоятельно и с помощью ЭВМ определенную часть задач проектирования. Понятие САПР в содержательном смысле означает конструирование, возможности автоматизации которого, обеспечиваются использованием цифровых вычислительных средств. САПР можно понимать и как создание и преобразование информации с использованием ЭВМ.

Соответственно технологическая подготовка производства с использованием ЭВМ является преобразованием технологической информации. Отсюда и вытекает понятие проектирования с помощью ЭВМ как процесса, который может выполняться на ЭВМ или в режиме диалога «человек-ЭВМ».

За последние десять лет отмечается значительный рост применения ЭВМ в обувной промышленности. Первоначально ЭВМ применялись главным образом только для решения задач в области управления и учета. В настоящее время ЭВМ в виде персональных компьютеров успешно применяются для выполнения технических задач и функций в технологическом процессе изготовления обуви. Их применение на предприятиях незаметно, поскольку они встроены в оборудование (швейные автоматы, затяжные машины и т. д.).

Быстрое развитие системы САПР (автоматизированное проектирование) в обувной промышленности привело к значительному повышению производительности труда и снижению себестоимости. Во многом это стало возможным благодаря совершенствованию математических методов машинной обработки графической информации.

Применение математических методов интересно, по крайней мере, с двух позиций. Во-первых, на базе применения электронных вычислительных машин и средств машинной графики возможна автоматизация проектно-конструкторских работ, освобождающих труд конструктора от рутинных расчетов и оформления технической документации. Во-вторых, использование станков с числовым программным управлением (ЧПУ) автоматизирует технологические процессы изготовления эталонов колодок, их серийное тиражирование и обработку оснастки для формования и литья деталей обуви (жесткие задники, подошвы, профилированные стельки и т. п.).

Математические методы при разработке обувных колодок стремились использовать и ранее. На первом этапе развития методологии проектирования в 1938 г. Ю.П. Зыбиным и А.А. Рындишем было предложено математическое выражение отдельных участков развертки поверхности следа [1], но недостаточная подготовка модельеров-колодочников и сложность рутинных расчетов по формулам явились причинами отказа в то время от математического описания контуров колодки.

В настоящее время это направление исследований продолжено в разных

странах на более высоком уровне и решает вопросы конструирования колодок как части общей системы проектирования обуви.

В РФ наиболее значительные работы по созданию научно обоснованных методов графического отображения поверхности обувной колодки с применением ЭВМ и автоматического изготовления моделей колодок на станках с ЧПУ были проведены в МТИЛП научной школой проф. Ю.П. Зыбина, а затем В.А. Фукиным с учениками А.Д. Бопеевым, Н.Н. Омельченко, Б.А. Яковлевым, Б.С. Пашаевым, В.В. Костылевой, В.П. Лыбой, С.Ю. Киселевым и др. Ими сформулированы наиболее важные проблемы автоматизации процесса проектирования внутренней формы обуви, разработана концепция автоматизированного проектирования обуви (САПРО), намечены пути автоматизации таких определяющих этапов конструирования, как получение и представление информации о форме и размерах стопы и колодки, переход от размеров стопы к размерам внутренней формы обуви, градирование колодок и прессформ, подготовка исходных данных для изготовления колодок на станках с ЧПУ. В последнее время проблемой создания САПРО занимаются коллективы под руководством В.М. Кагана – система "АСКО-2Д", М.В. Андреева – система "Ассоль", а также в МГУДТ по созданию комплексной, сквозной системы автоматизированного проектирования и изготовления технологической оснастки обувного производства.

Работы по созданию САПРО проводились и проводятся крупнейшими научными и промышленными центрами мира, специализирующимися на производстве обуви и оборудования для обувной промышленности. За последние 30 лет создан целый ряд комплексов САПР обуви. Среди САПР, решающих задачи градирования и вырезания шаблонов деталей, за рубежом следует отметить системы "Gradaraatik" (Gerber Camsco, США), "IGS-80" (USM, США), "FDS-100" и "FDS-200" (Microdynamics, США). Задачи двухмерного конструирования деталей верха решает система "ГИСО", разработанная институтом вычислительных и технико-экономических служб Чехии, и система "E-92" (Lectra, Франция).

Среди существующих САПРО наибольший интерес представляют системы, позволяющие работать с пространственными объектами проектирования. Данные системы отличаются наиболее развитой структурой, большим объемом периферийных устройств. К таким системам следует отнести "Polysurf" (CAD - Computer Aided Design, Великобритания), "APEX-1000" (Gerber Camsco, США), "FDS-300", "FDS-350", "FDS-1500", "FDS-2000" (Microdynamics, США). К числу САПР, решающих сходный круг задач, могут быть отнесены "SchuCAM - Computer Aided Manufacturing" (Siemens, ФРГ), "COMPO" (Industries, США), "ShoeMaster" (Clarks, Германия), "ShoeMaker" (Gerber Systems Technology, Германия). Последними разработками являются системы "Digiton" (Канада) и "Dimensions" (ProCAM, Австрия).

Лекция 1. Использование ЭВМ в обувной промышленности

Сквозные САПРО или единые автоматизированные системы проектирования и управления производственными процессами (CAE – Computer Aided Engineering) предназначены для решения двух групп задач: 1) задачи автоматизированного проектирования колодок, деталей верха, прессформ и др.; 2) задачи автоматизированного управления производством этих изделий на программно управляемом оборудовании. При изменении функционального назначения, вида материала и конструкции проектируемой обуви общий круг задач, решаемых конструктором, последовательность их выполнения остаются практически неизменными.

Типичную структуру комплекса автоматизированного проектирования обуви рассмотрим на продукте наиболее успешно конкурирующей в этом сегменте европейского рынка фирмы Vicas (Австрия).

Фирмой Vicas создано семейство систем САПР, имеющее название Padsy (Pattern Design/Pattern Development System), т. е. система проектирования и градирования обуви и ее деталей. Фирмой был проведен анализ аналогичных систем с учетом их преимуществ и недостатков, а также внесены новые оригинальные предложения.

При разработке концепции комплекса систем САПР/АПД преследовались две главные цели: комплекс должен охватывать процессы проектирования и изготовления обуви с одновременным изготовлением необходимой технологической оснастки; комплекс должен быть несложным в изучении и эксплуатации. Поэтому при создании системы Padsy за основу был принят модульный принцип. В зависимости от стадий проектирования обуви используется тот или иной модуль.

Модельеры, занятые в обувной промышленности, делятся на модельеров-художников и модельеров-конструкторов. Первые создают внешний вид будущей обуви, вторые разрабатывают ее технические аспекты, и их главной задачей является преобразовать объемное изображение обуви и плоские двухмерные детали. Используя систему Padsy, модельер-художник может разработать значительно большее, чем раньше, количество эскизных вариантов новой модели обуви. При помощи рисующего стержня воспроизводится на дисплее внешний вид будущей обуви. При этом имеется возможность увеличения или уменьшения изображения, его разворота, различной окраски деталей обуви, проработки отдельных компонентов обуви; подошв, каблуков, язычков, украшений и т. д.

Для обувных фабрик, заинтересованных не только в разработке внешнего вида обуви, но и в автоматизированном построении деталей обуви, создана система Padsy III.

Модуль Padsy III позволяет получить объемное изображение обуви, т. е. выполнить так называемое «поверхностное моделирование» (Surface Modeler). Благодаря математической интерпретации колодки компьютер последователь-

но, точка за точкой, воспроизводит изображение на дисплее. Кроме того, объемное изображение (3D) может трансформироваться в плоское (2D) и обратно. Полученные данные образуют программу для станков с ЧПУ, необходимых для изготовления пресс-форм, колодок и т. д.

Благодаря системе Padsy III можно производить оценку фасона колодки или внешнего вида обуви путем изображения на дисплее в различных ракурсах. Возможно получить также плоское изображение проекций. Далее модельер может ввести разработку объемной модели непосредственно на изображение колодки с помощью трехмерного цифрового преобразователя с последующим автоматическим преобразованием объемного изображения в плоское.

Таким образом, используя модуль Padsy III, модельер может:

1. Прорисовывать различные варианты моделей обуви непосредственно на изображении колодки на дисплее. Эта операция выполняется на столе модельера с помощью рисующего стержня.
2. Получать базовую модель обуви на колодке.
3. Производить объемное градирование колодки или модели обуви.
4. Выдавать задания станкам с числовым программным управлением для изготовления объемных изделий: пресс-форм, колодок и т. д.

Таким образом, в своей работе модуль используют главным образом модельеры-художники.

Модельер-конструктор начинает детализирование моделей обуви с помощью модуля Padsy III. За основу принимается или базовая модель обуви, разработанная с помощью модуля, или модель, выполненная традиционным способом. В этом случае данные в модуль Padsy II вводятся с помощью преобразователя.

Модуль Padsy II производит построение шаблонов деталей верха обуви с учетом припусков на загибку, затяжку и т. д., а также шаблонов подкладки, межподкладки и других шаблонов деталей обуви. Следующей операцией является градирование полученных шаблонов на весь ростовочный ассортимент обуви.

Перед градированием необходимо производить анализ себестоимости обуви. Для этого необходим быстрый расчет площадей деталей обуви. Эту функцию выполняет модуль Padsy-Area. Расчет ведется как по методу параллелограммов, так и по методу линейных величин. На основании анализа полученных результатов для оптимизации стоимости может производиться коррекция площади какой-либо детали, вызывающая изменение конфигурации смежных деталей.

Для выполнения различных инженерных расчетов, связанных с проектированием технологической оснастки, предназначен модуль Padsy-Tech.

Для планирования и анализа проделанной работы используется быстродействующий модуль Padsy-Lan, работающий на основе концепции сетевых графиков, наиболее распространенной в настоящее время.

Недостатком всех компьютеров является сброс данных в блоке памяти

при отключении питания или неполадках. Модуль Padsy-Filing производит запись манипуляций модельера на магнитной ленте. При повторном включении компьютера на дисплее автоматически воспроизводятся все предыдущие операции, и модельер имеет возможность продолжать работу с того места, где он остановился.

После выполнения операций стоимостного анализа, внесения изменений и градирования полученные данные с помощью модуля Padsy DMM (Device Driver Module) передаются на устройство для раскраивания шаблонов. Шаблоны могут вырезаться или фрезероваться в зависимости от твердости материала. Одновременно производится их маркирование (наносится номер модели, площадь шаблона и т. д.).

С помощью графопостроителя можно вычерчивать различные кривые, необходимые для изготовления технологической оснастки. Эти же данные могут использоваться для управления фрезерными станками с ЧПУ, изготавливающими кассеты для швейных автоматов, колодки или пресс-формы.

Для изготовления резаков система Padsy объединяется с системой Viking-Scie шведской фирмы Scomab. В результате серия машин фирмы Scomab изготавливающих резаки, последовательно автоматизируется. В настоящее время работа установки Viking-Delta для выравнивания и отрезания заготовки резака из ленточной стали по размеру управляется модулем Padsy-Gut-Moduls. Таким образом, используя систему САПР, оказывается возможным оценивать расход материалов и выбирать оптимальный вариант раскладки шаблонов, внося необходимые изменения в конфигурацию деталей верха обуви.

Благодаря этому коэффициент использования материала составляет от 72 % до 84 %. Однако существует опасность недостаточной величины припуска на затяжную кромку. Отсюда становится ясным значение знаний и опыта модельера.

Ниже приводится специфика программной продукции фирм, выпускающих системы САПР для обувной промышленности.

Фирма Microdynamics Inc. (США) разработала систему автоматизированного проектирования (САПР) FDS 350, которая позволяет на основе данных о форме колодки формировать реалистическое изображение разрабатываемой модели обуви на экране известного монитора. После завершения разработки модели эта информация преобразуется в данные, с помощью которых осуществляется двухмерное моделирование отдельных деталей обуви. На базе такого моделирования производится раскрой картонных лекал и материалов.

По словам специалистов этой фирмы, основной целью данной системы является ликвидация проведения дорогостоящих производственных испытаний разрабатываемой продукции. Использование системы FDS 350 также позволяет ускорить процесс изготовления лекал. Эта система успешно внедрена на нескольких промышленных предприятиях как в странах Европы, так и в США.

Фирма British United Shoe Machinery (Великобритания). Многоцелевая система Crispin состоит из двух частей: очень гибкой в легкой в использовании

двухмерной системы запрограммированной на управление раскроем шаблонов, и отдельного узла для фотографирования моделей обуви с получением четкого рельефного изображения. Пользуясь изображениями модели на экране или на фотографии, можно вносить в них цветовые и конструктивные изменения, что позволяет очень быстро разрабатывать целый ряд моделей.

Фирма Kadic (Бельгия). Компьютер с дисплеем, на экране которого можно создавать модели из плетеных полосок кож различных цветов, взятых в любых сочетаниях. После этого команды от компьютера поступают к рабочим органам машины для плетения.

Фирма Minola Felice (Италия). Специализируется на производстве оборудования для изготовления шаблонов и их градирования. Пантограф управляется микропроцессором, дающим информацию о размерах и полнотах модели обуви. Любые изменения в моделях обуви могут быть быстро введены в микропроцессор с помощью управления.

Фирма Lectra (Франция). Системы САПР для проектирования моделей обуви в двухмерном изображении, а также система для раскроя кож, управляемая компьютером.

Применение системы для раскроя позволяет получить экономический эффект за счет уменьшения стоимости раскройных резаков и времени раскроя. Раскрой начинается после того, как получено изображение модели на экране. В процессе выполнения раскроя компьютер подсчитывает количество выкроенных деталей.

Кожу укладывают на стол с шероховатой пластиковой поверхностью и накрывают прозрачной пластиной из ПВХ, прижимающей кожу с помощью вакуума. Пороки, имеющиеся на коже, отмечают фломастером, после чего специальное устройство считывает эту информацию и передает компьютеру. Одновременно квалифицированный оператор подбирает лекала и размещает их на коже, изображение кожи с лекалами индицируется на экране, после чего информация передается раскройному устройству, и производится раскрой кожи.

Производительность системы лишь немного выше, чем у двух квалифицированных рабочих, выполняющих раскрой на традиционных раскройных прессах: один человек требуется для разметки кожи, а другой – для размещения лекал и удаления выкроенных деталей.

Недостатком этой системы является то, что нельзя одновременно готовить следующую кожу для раскроя, в то время как раскраивается предыдущая. Это означает, что раскрой не производится, пока оператор размещает лекала на коже и, наоборот, в процессе раскроя нельзя выполнять раскладку лекал. Для оптимизации процесса необходимо наличие двух раскройных столов.

Фирма Cimtech (Канада) предлагает новую модульную систему серии Descom 3000 для автоматизированного проектирования обуви в трехмерном изображении. Каждая система серии Descom 3000 оснащена компьютерными классами VAX фирмы Digital Equipment и цветными дисплеями с экраном размером 45,6 см по диагонали.

Система серии Descom 3000 состоит из трех моделей: Descom 3500 – для градирования; Descom 3600 – для моделирования обуви и Descom 3800 – для получения графических изображений в трехмерном представлении.

Система Descom 3500 позволяет полностью произвести проектирование моделей любой сложности, их оценку и градирование точно и аккуратно, с небольшими затратами. Система совместима с другими модулями трехмерных систем фирмы Cimtech.

Система Descom 3600 используется для моделирования обуви в трехмерном представлении, автоматического изготовления средней копии колодки или образца, а также для конструирования деталей и их оценки. Процесс моделирования начинается с выбора колодки и оцифровывания ее с помощью устройства Cimtech's Digiton. Полученное таким образом трехмерное изображение колодки можно модифицировать, например, путем изменения высоты приподнятости пяточной части или наполненности носочной части.

Система Descom 3600 позволяет наносить конструктивные линии модели либо на изображение колодки, либо на ее среднюю копию. После того, как модельные линии нанесены на колодку, специальная камера проецирует ее изображение на экран, и производится дальнейшая прорисовка линий. Камера также дает возможность копировать линии модели с образца или даже с фотографического изображения обуви. Изображение колодки можно «накладывать» на изображение обуви, снятое камерой компьютера после чего конструктивные линии модели легко вычерчиваются на поверхности колодки.

Система Descom 3800 позволяет предельно аккуратно производить градирование деталей обуви, что обеспечивает в дальнейшем точную посадку заготовки на колодку в процессе выполнения обтяжно-затяжных операций. При градировании колодок осуществляется автоматический контроль за изменением размеров, все копии колодок точно соответствуют оригиналу. Это обеспечивает одинаково точную посадку заготовок верха обуви на колодку независимо от ее размера.

В системе Descom 3800 изображения моделей могут быть получены либо под углом, на них можно наносить различные декоративные линии и воспроизводить текстуру материала.

Лекция 2. Основные принципы построения САПР обуви

Целью любого конструирования является разработка и формирование функций изделия путем переработки геометрической, технологической и организационной информации; подготовка производства обеспечивает технологическую реализацию превращения исходной заготовки в изделие. Поэтому конструирование можно интерпретировать как геометрическую обработку информации, обеспечивающую выполнение функциональных требований к изделию, а подготовку производства – как геометрическую обработку информации,

обеспечивающую выполнение технических и технологических требований к изделию.

При применении ЭВМ нет необходимости в разделении цикла создания изделия на две стадии, первая из которых имеет целью обеспечение целевой функции изделия, а вторая – технологии производства этого изделия. Если не ставить условия, чтобы один исполнитель смог самостоятельно выполнить обобщенную обработку информации в самых сложных технических ситуациях, то можно ожидать, что использование ЭВМ значительно увеличит шансы на успех взаимной увязки информационных данных, относящихся к конструированию и технической подготовке производства. Именно этот смысл вкладывается в понятие САПР, означающее деятельность человека, использующего ЭВМ для конструирования и подготовки производства.

Исследование – это целенаправленная системно-методическая работа для получения знаний, необходимых для выработки качественно новых решений.

Разработка – это рациональное использование результатов исследований (в том числе и технико-экономических) в целях получения новых изделий или модернизации уже существующих.

Конструирование – это творческая реализация технического замысла изделия, определение его функциональной структуры и технологии изготовления. Конструирование включает процедуры обдумывания и отображения, выбор материалов и технологии изготовления; оно должно обеспечивать возможность экономически целесообразного материального воплощения технической идеи. Различают новое конструирование, конструирование на основе аналогов и вариантное конструирование.

Под конструированием понимается не только соединение частей в единое целое, но формирование составных частей этого целого. Конструирование может означать соединение деталей, определение их взаимного расположения, определение формы и функций изделия, а также разработку документации для изготовления. Это также исследование и поиск конструктивного решения.

Конструкция – это система, составленная по определенным правилам из отдельных функциональных элементов. Это определение находит свое подтверждение также в первоначальном значении слова. В латинском языке слово *construere* означает сборку, компоновку, нагромождение, а также сооружение.

Функционирование САПР определяет новую прогрессивную технологию проектирования, основанную на взаимодействии человека и ЭВМ. Последовательность этапов или проектных процедур в системе называется маршрутом проектирования объекта.

Проектная процедура – это часть этапа проектирования, выполнение которой заканчивается получением проектного решения (например, получение чертежа изделия, выбор типовой конструкции, расчет параметров и т. д.). Более мелкие составные части процесса проектирования, входящие в состав проектных процедур, называют проектными операциями. В зависимости от степени участия человека и использования ЭВМ различают несколько режимов проек-

тирования.

Автоматический режим проектирования осуществляется при выполнении маршрута проектирования по формальным алгоритмам на ЭВМ без вмешательства человека в ход решения. Автоматизированное проектирование характеризует процесс, в котором часть процедур в маршруте выполняется человеком, а часть – с использованием ЭВМ. Такой режим характеризует невысокую степень автоматизации проектирования.

Диалоговый (интерактивный) режим является более совершенным режимом, при нем все процедуры в маршруте выполняются с помощью ЭВМ, а участие человека проявляется в оперативной оценке результатов проектных процедур или операций, в выборе предложений и корректировке хода проектирования. Если инициатором диалога является человек, то он (диалог) называется активным. Если прерывания вычислений происходят по командам программы, то диалог называют пассивным.

Во многих случаях пользователь САПР в режиме диалога только вводит и редактирует исходные данные для выполнения определенного маршрута проектирования, а непосредственное исполнение процедур производится в автоматическом (пакетном) режиме работы ЭВМ.

С точки зрения информатики процесс конструирования можно представить в виде информационного потока, в котором различают создание, переработку, накопление и выдачу информации.

Информационный поток, реализуемый в процессе проектирования с помощью изобразительных и абстрактных представлений, учитывающих пространственные и временные соотношения, характеризуется качеством и интенсивностью. При этом важным фактором являются знание и доступность относящихся к нему данных. Плохое проектирование часто является следствием недостаточных знаний.

С точки зрения системотехники процесс конструирования может быть представлен в виде некоторой реальной системы, построенной путем упорядочения отдельных элементов и описываемой с помощью логических выражений. Числовые значения логических выражений определяются в процессе проектирования, и их совокупность фиксируется системой на соответствующих носителях информации в виде графических, алфавитно-цифровых или комбинированных данных.

Различные сведения о функциях системы записываются на различных носителях (чертежах, спецификациях, технологических картах, программах для станков с ЧПУ и др.) в графическом, алфавитно-цифровом или в смешанном виде. При конструировании сложных объектов быстрое принятие частных решений весьма затруднительно, так как возможности отдельного человека ограничены, и он не может осмыслить одновременно все аспекты неожиданно возникающей перед ним новой задачи и решить ее с учетом всех целевых функций создаваемой конструкции. В таких случаях целесообразно использовать системотехнические методы, разработка которых требует проведения предваритель-

ного анализа процесса конструирования.

В последние годы интенсивно велись разработки основ так называемого методического подхода в конструировании. Методика конструирования облегчает поиск оптимального решения, объединяет в единый процесс различные смежные вопросы и способствует применению вычислительной техники для обработки данных. Систематика и методика конструирования является важным подготовительным этапом при переходе к конструированию с применением ЭВМ.

Процесс конструирования состоит из нескольких последовательных этапов: разработка замысла изделия, определение его структуры и затем детализация. При использовании ЭВМ, когда объединяются конструирование и разработка технологии изготовления, различают следующие этапы: определение функциональной структуры изделия, разработка принципа действия, детализация и подготовка производства.

Процесс конструирования может быть итеративным с повторением выполнения более ранних этапов, что наиболее часто требуется при конструировании сложных технических объектов.

Значительная часть работ при конструировании может быть выполнена с применением ЭВМ, если имеются типовые алгоритмы процедур. Однако решающая роль при поиске оригинальных конструктивных решений остается за конструктором. При конструировании с использованием ЭВМ наиболее рационально использовать режим активного диалога с ЭВМ, где все принципиальные решения принимает конструктор, а вычислительные процедуры выполняются в нужной последовательности автоматически.

Оптимизация при конструировании может охватывать широкий круг вопросов. При конструировании определяются качественные и экономические характеристики будущего изделия. Значительное повышение производительности труда конструкторов является в настоящее время весьма актуальной задачей, так как с увеличением сложности проектируемых изделий существенно возрастают затраты времени на проектирование. Возникло определенное отставание темпов роста производительности труда конструкторов по сравнению с технической подготовкой производства. Использование ЭВМ призвано не только значительно сократить сроки конструирования, но и улучшить качество конструктивных решений.

Лекция 3. Проектирование с помощью ЭВМ

САПР как система включает в себя технические средства, системное программное обеспечение, прикладное (или пользовательское) программное обеспечение и самого проектировщика. Производительность САПР в решающей степени зависит от прикладного программного обеспечения, возможности применения которого, несмотря на высокую эффективность и простоту экс-

плуатации, сдерживаются трудностями алгоритмизации конструкторских задач. Именно поэтому особое значение должно придаваться созданию диалоговых систем.

Сложность и многообразие задач, решаемых САПР, приводят к необходимости дробления программного обеспечения САПР на отдельные программные модули. Центральная роль принадлежит модулю преобразования данных об объекте проектирования во внутримашинное представление объекта (ВПО). Важное место занимают программные модули, обеспечивающие возможность работы конструкторов и технологов с ЭВМ в пакетном или диалоговом режиме. Создаются программные модули, обеспечивающие разработку технической документации, чертежей, спецификаций, технологических карт, управляющих программ для станков с ЧПУ и выполнение контрольных операций.



Рисунок 3.1 – Состав аппаратных средств комплекса САПР
Первые опыты промышленного использования САПР показали наиболее

рациональные области их первоочередного внедрения. Наибольший успех был достигнут там, где САПР органично связана с существующим производством и где исполнители благодаря внедрению САПР освобождались от необходимости решения сложных и рутинных задач.

Основная роль в САПР принадлежит проектировщику, использующему соответствующие технические и программные средства. Он выполняет работу, находясь на месте (АРМ) и используя по своему усмотрению те или иные программные модули САПР. Особенностью программных модулей, ориентированных на диалоговую работу, является возможность доступа к информации, управления её обработкой и контроля результатов.

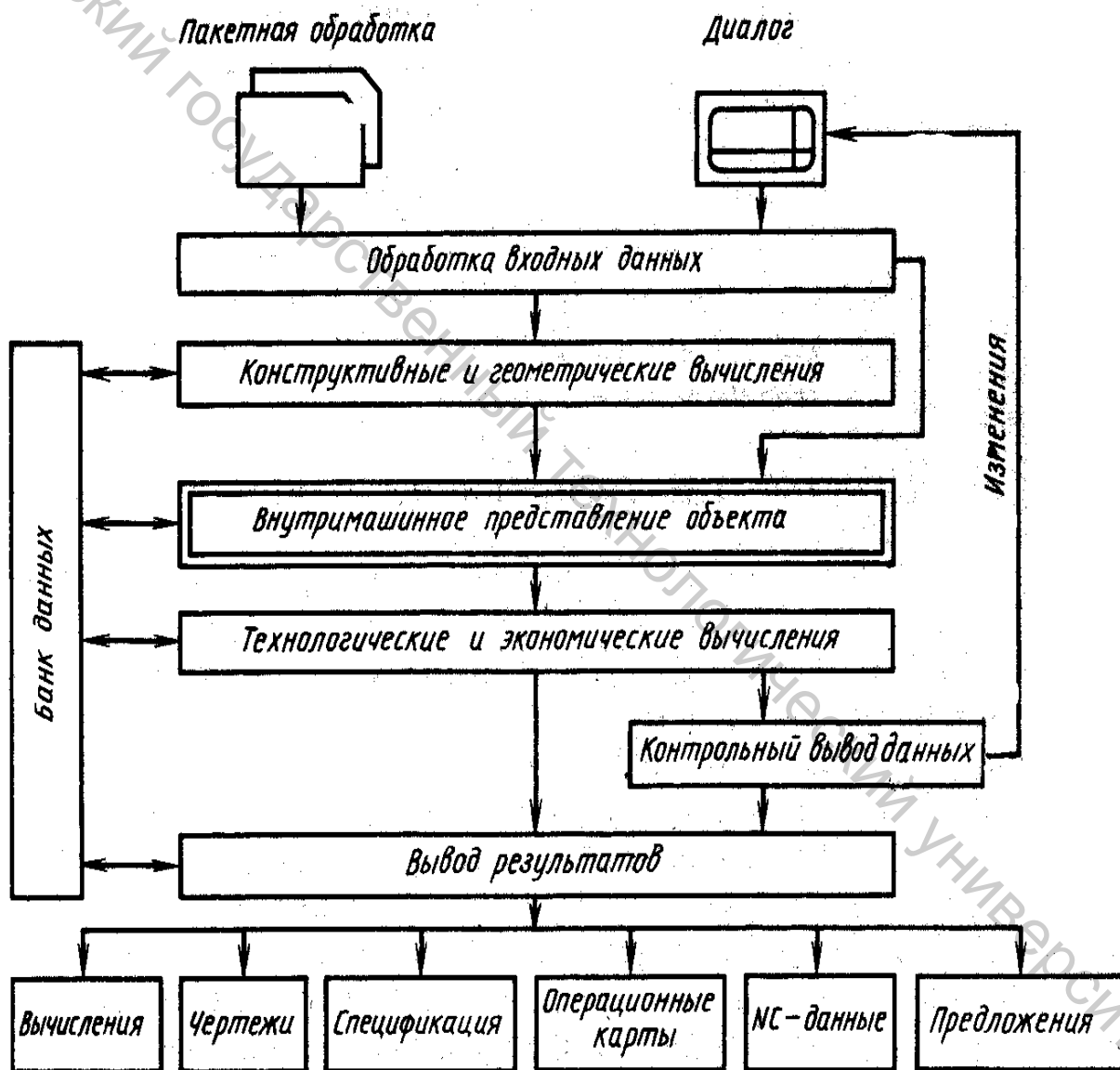


Рисунок 3.2 – Структура САПР

Графический диалог предоставляет дополнительные возможности работы

не только с буквенно-числовой информацией, но и с чертежами. Графический ввод информации обеспечивается считыванием значений координат с экрана дисплея или планшета с помощью специальных устройств. Это позволяет сделать контроль процесса проектирования более наглядным, а также предупредить возможные ошибки при решении задач, использующих численные методы. САПР предусматривает различную степень автоматизации, а модульный и иерархический принципы построения позволяют путем замены отдельных модулей обеспечить живучесть системы и ее совершенствование.

Технология САПР объединяет проектирование, подготовку производства и контроль качества продукции. Согласно определению, технология САПР – это методика обработки информации при автоматизированном проектировании и изготовлении. Она граничит с областью прикладной информатики и находится в тесной связи с графической обработкой данных. Понятие «технология САПР» должно четко определять предметно-методическое содержание работ. Это понятие нужно отличать от понятия «техника САПР».

Техника САПР тесно связана с такими разделами геометрии, как аксиоматика, проективная геометрия, топология, аналитическая и начертательная геометрия. В аксиоматике отношения между основными понятиями определяются как свойства аксиом. Проективная геометрия исследует свойства и составные элементы геометрических объектов, не изменяющиеся в процессе проектирования. Топология изучает взаимосвязи внутри объекта проектирования. В аналитической геометрии с помощью вычислительных методов решаются различные задачи, связанные с геометрическими построениями.

Начертательная геометрия предоставляет возможность графического отображения на плоскости трехмерных объектов. Целью начертательной геометрии является отображение в одной плоскости объемных тел. В качестве средства изображения объемных фигур применяются методы машинной графики, зависящие от требований к получаемому изображению. Отображение должно удовлетворять требованиям наглядности с точки зрения дискретности или разрешающей способности отображающего внешнего устройства: большая дискретность определяет малую наглядность, и наоборот.

Методы начертательной геометрии, реализуемые на ЭВМ, включают в себя программные средства, которые могут генерировать ВПО пространственных объектов и отображать их с помощью средств графического вывода. Можно было бы говорить о геометрии САПР как таковой, если бы понятие САПР было введено в качестве понятия более высокого уровня в перечень геометрических понятий. Определение САПР, в строгом смысле этого слова, имеет отношение к геометрическим и организационным аспектам проектирования, и поэтому можно говорить о машинном моделировании процесса проектирования или о машинном геометрическом моделировании.

Успешное внедрение САПР зависит от обеспечения САПР программами и техническими средствами и от уровня взаимодействия САПР с пользователем. Возможности, которые САПР предоставляет пользователю, определяются

в основном программным обеспечением. Программное обеспечение САПР зависит от конкретного случая его применения и поставленной задачи. Операционная система должна обеспечить связь пользовательских программ с техническими средствами и управлять, например, ведением диалога и редактированием вводимых данных. Производственные возможности программного обеспечения САПР определяются архитектурой системы, производительностью, удобством пользования, гибкостью, переносимостью (на другие ЭВМ), способностью встраивания в другие системы, надежностью, уровнем стандартизации, пригодностью к использованию в различных условиях, способностью к расширению, независимостью от конкретных внешних устройств, совместимостью, точностью и достоверностью.

Последовательность решения отдельных задач в САПР обеспечивается работой программных модулей; при этом возможны ручной ввод исходной информации для следующего программного модуля и программная стыковка отдельных модулей. Если для работы каждого модуля необходим свой запуск программ, говорят о наличии ряда программ. При обеспечении программной стыковки модулей говорят о существовании программной сети или цепи.

Объединение программы САПР может быть достигнуто благодаря банку данных таким образом, что при использовании программной сети данные передаются из одной программы в другую. Программа, выполняемая на более ранней стадии, генерирует данные, которые вначале записываются в определенной зоне дискового накопителя, а затем считываются следующей программой.

Формирование внутримашинного представления объекта (ВПО) включает в себя способ описания и хранения данных, сформированных в соответствии с заданной структурой и по заданным алгоритмам.

Совокупность данных, содержащаяся в ВПО, представляет собой информацию, полученную путем переработки исходных данных на основе известных правил. ВПО, хранящееся на внешних носителях памяти, может использоваться различными программными модулями, отображаться в графической форме и подвергаться обработке и изменениям. На различных этапах функционирования САПР используется общее ВПО.

Объединение модулей посредством формата данных и ВПО возможно на основе использования банка данных.

Программные стыки между отдельными модулями САПР затрудняются, если ВПО строятся на различных геометрических, топологических и технологических признаках.

В целом можно представить себе программные стыки САПР следующим образом:

- 1) стыковка с помощью однородной базы данных, использующей одинаковые ВПО для всех модулей системы;
- 2) стыковка с помощью неоднородной базы данных, использующей пре-процессоры и постпроцессоры, для прямой передачи данных между системами

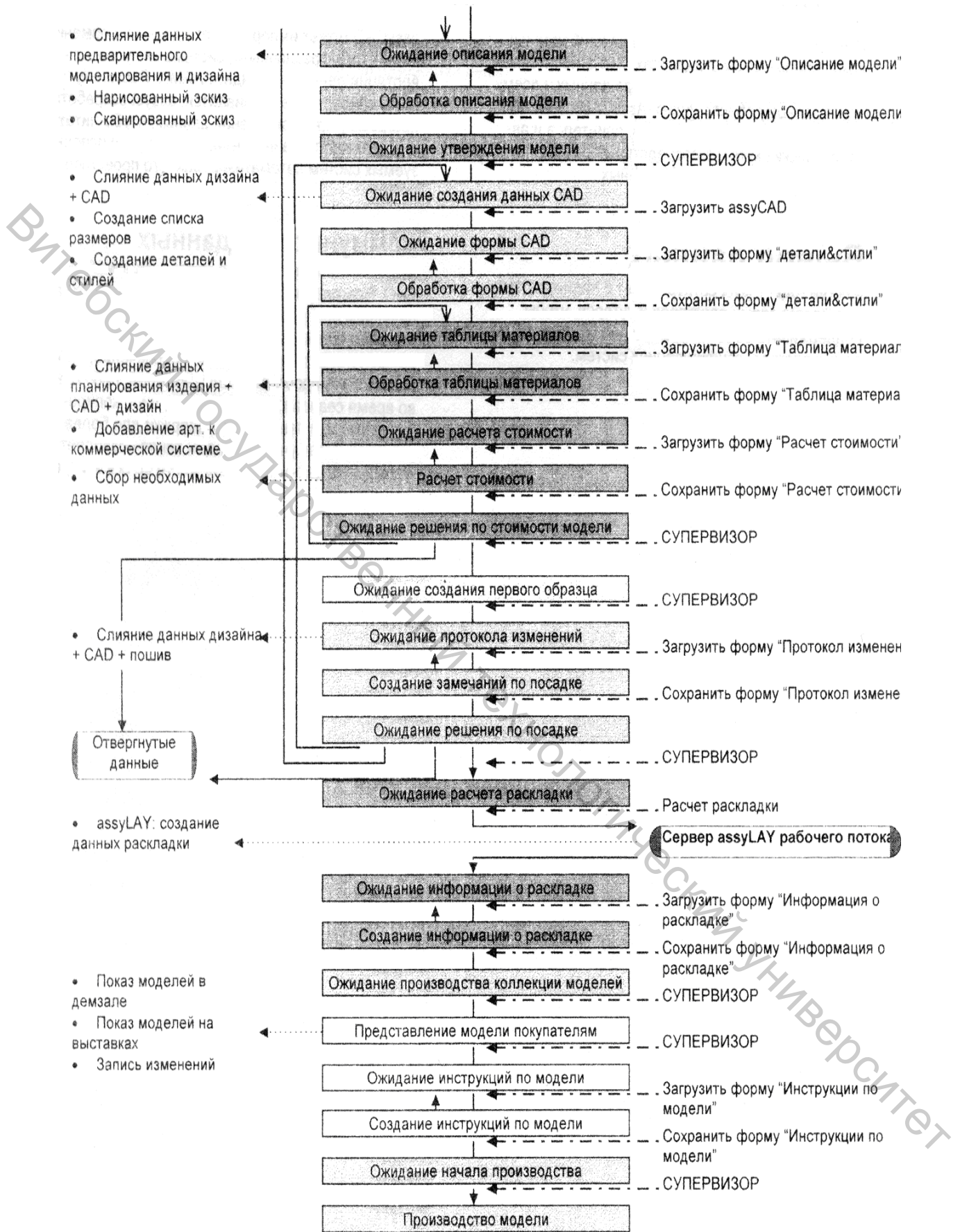


Рисунок 3.3 – Организация потоков информации в САИР “ASSYST”

с различным ВПО.

В интегрированной системе объединяются подсистемы конструирования, геометрического моделирования разработки технологии изготовления проектируемых изделий; основой объединения является использование общей базы данных.

Создание интегрированных САПР на основе общих баз данных довольно развито. Интеграция подсистем САПР, основанная на этом принципе, позволяет выбирать из имеющегося набора программные модули, способные решать ряд взаимосвязанных задач. В интегрированных САПР наряду с программными модулями, реализующими решение отдельных задач, имеется программа, организующая обмен данными. Такого рода операции выполняются, например, при передаче производственных данных поставщикам. При этом связь может быть осуществлена в режиме off line – автономном режиме или режиме on line – под непосредственным управлением ЭВМ.

Дальнейшая интеграция программного обеспечения возможна благодаря построению баз данных на основе методов, используемых при создании искусственного интеллекта. Такие экспертные системы применяют для решения специальных задач.

Наибольшие удобства для пользователя представляют диалоговые САПР, в которых предусмотрен цикл обмена информацией между человеком и ЭВМ. Возможны два вида диалога: жесткий и свободный. Соответственно диалог реализуется путем ввода алфавитно-цифровых инструкций с графическим изображением результатов или чисто графического ввода данных.

Для создания ощущения комфортности у человека, работающего в режиме диалога с ЭВМ, используются следующие приемы и средства: ввод информации с помощью языка программирования, например, АРТ; диалог, использующий алфавитно-цифровые символы и графические элементы; синтез из отдельных элементов трехмерных геометрических построений; методы конструирования на базе аналогов, предполагающие получение минимальной информации от пользователя, благодаря языкам описания конструкций, технологии и предоставляемой возможности автоматической стыковки процесса конструирования с подготовкой технологии обработки и программноносителей для станков с ЧПУ.

При разработке программного обеспечения САПР в зависимости от требований, предъявляемых к объему информации и реализации диалога, используют 32- или 64-разрядные мини-ЭВМ. Эксплуатация САПР возможна на одной или нескольких ЭВМ, объединенных в систему, при этом особое значение приобретают локальные сети ЭВМ.

В зависимости от степени специализации по типам объектов различают объектноориентированные (объектные) и объектно-независимые (инвариантные) подсистемы.

САПР должна быть открытой и развивающейся системой в силу ряда причин. Во-первых, разработка САПР требует значительного времени, поэтому

экономически выгодно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Во-вторых, постоянный прогресс вычислительной техники и совершенствование вычислительной математики приводят к появлению новых, более эффективных математических моделей и программ. Поэтому САПР должна обладать способностью наращивания и совершенствования, пополнения и обновления подсистем и компонентов.

Принцип инвариантности предполагает, что подсистема и компоненты САПР должны быть по возможности универсальными, или типовыми, и функционировать независимо друг от друга, обеспечивая возможность решения большого количества задач каждой подсистемой. При этом символы, коды должны быть согласованы так, чтобы обеспечивалось совместное функционирование всех подсистем и сохранялась открытая структура системы в целом.

САПР различных отраслей промышленности следует рассматривать как специализированные системы. Однако требования высокой эффективности и универсальности, как правило, противоречивы. Специализацией систем можно достичь высокой эффективности, но при этом возрастают расходы на их разработку. Опыт создания САПР показывает, что специализированные системы целесообразно строить с использованием унифицированных составных частей – модулей. Необходимое условие унификации – поиск общих черт и положений в моделировании, анализе и синтезе разнородных технических объектов, что обеспечивает в конечном итоге универсальность многих программных технических средств обеспечения.

Основными структурными звеньями САПР являются подсистемы. Подсистемой САПР называется выделенная по некоторым признакам часть САПР, обеспечивающая получение законченных проектных решений и соответствующих проектных документов.

Каждая подсистема состоит из набора задач, в функциональном отношении тесно связанных между собой и в то же время образующих некоторую автономную часть системы. Построенная таким образом система позволяет вести разработку, отладку и внедрение в производство ее структурных звеньев как самостоятельных систем.

Анализ работы по созданию отдельных подсистем САПР показал два основных подхода к решению задач частичной автоматизации проектирования обуви:

- 1) получение контуров модели обуви на колодке, когда контуры деталей задают дискретным каркасом минимального количества точек и задают граничные условия на концах кривых и коэффициент натяжения;

- 2) получение контура на колодке, определение координат точек, принадлежащих линиям контура модели на развертке боковой поверхности колодки с последующей интерполяцией данных точек и выводом на графопостроитель; при этом считают, что линии контура модели на колодке среднего размера являются технологическими, в процессе обработки преобразующиеся в конструктивные с учетом деформации верха.

Указанные подходы к созданию САПР основаны на методе «жесткой оболочки». Общим недостатком данных подходов является то, что при разработке каждой новой модели осуществляется обмер кривых конструктивных элементов по жесткой оболочке с переносом на условную развертку.

Этого недостатка лишен копировальный способ построения модели, в основу которого положена условная развертка боковой поверхности колодки. Получение копии боковой поверхности колодки позволяет более точно строить заготовку верха, при этом используется накопленный опыт графического моделирования, такой принцип используется в комплексах ГР проектирования обуви.

При разработке САПР используется системный подход, что дает возможность разделить процесс проектирования на основные части с получением многоуровневой системы:

- проектирующие подсистемы (объективный признак): проектирования верха обуви, серийного градирования, оптимальной укладки и т.д.;
- проектные процедуры (признак – базисная основа);
- проектные операции (признак – грундмодель).

При построении САПР используются принципы системного единства САПР, совместимости компонентов, модульный принцип построения, открытость САПР и согласованность с традиционным конструированием обуви. При выборе структуры САПР следует учитывать, что язык общения с САПР должен быть ориентирован на неподготовленного пользователя. Знание языка общения дает возможность оперировать терминами прикладной области и задавать режимы работы САПРО; вводить и корректировать атрибуты (параметры), влияющие на процесс проектирования обуви; выбирать по значениям различных ключей и условий хранимые в системе проектирования атрибуты.

Каждая подсистема САПР составлена из функциональных частей, или компонентов, объединенных общей целевой функцией и обеспечивающих работоспособность этой подсистемы.

Компонентами САПР являются элементы обеспечения: методического, математического, программного, информационного, лингвистического, организационного, технического.

Лекция 4. Виды обеспечения САПР

Каждая подсистема САПР составлена из функциональных частей, или компонентов, объединенных общей целевой функцией и обеспечивающих работоспособность этой подсистемы.

Методическое обеспечение определяет объект проектирования, процесс проектирования и взаимосвязь между машиной и человеком, т. е. что проектировать и как управлять процессом проектирования [9]. Оно составляется на основе тщательной проработки и анализа методологии проектирования. Поэтому

разработка методического обеспечения требует знания предметной области проектирования и технических средств, с тем, чтобы определить, какие этапы и задачи проектирования следует решать автоматически, какие оставить за проектировщиком, а какие необходимо осуществлять в интерактивном режиме пользователя и системы. Методическое обеспечение включает также совокупность документов, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизации проектирования. В методических документах каждой системы конкретизируется технология проектирования и содержится описание циклов проектирования, типовых сочетаний программ, рационального распределения функций между человеком и ЭВМ.

Математическое обеспечение включает математические модели объектов проектирования и их элементов, методы и алгоритмы выполнения проектных операций и процедур. Элементы математического обеспечения чрезвычайно разнообразны и определяются прежде всего спецификой проектируемых объектов. К инвариантным элементам, широко применяемым в различных САПР, относятся принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановка экспериментальных задач и т. д. Формы представления математического обеспечения разнообразны и реализуются в программном обеспечении САПР.

Программное обеспечение состоит из программ для ЭВМ, представленных на машинных носителях и в виде текстовых документов. Программное обеспечение (ПО) делится на общесистемное, базовое и прикладное (специальное). Общесистемное программное обеспечение предназначено для организации функционирования технических средств, т. е. для планирования и управления вычислительным процессом. В базовое программное обеспечение входят программы, обеспечивающие правильное функционирование прикладных программ. В прикладном программном обеспечении реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Прикладное программное обеспечение обычно имеет форму пакетов прикладных программ, каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач внутри различных этапов.

Информационное обеспечение представлено совокупностью методов и средств отбора, классификации, хранения данных в ЭВМ.

Техническое обеспечение САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования. Техническое обеспечение делится на группы средств программной обработки данных, подготовки и ввода данных, отображения и документирования, архива проектных решений, передачи данных от ЭВМ к терминалам (конечным пунктам вывода информации).

Одним из основных показателей технического обеспечения САПР являются высокая надежность оборудования и удобство пользования, чтобы гарантировать проектировщику получение достоверных результатов с наименьшими затратами труда.

4.1 Методическое обеспечение САПР верха обуви

На этапе технического проектирования необходимо выбрать оптимальную методику проектирования разрабатываемой модели путем сравнения существующих методик по критериям: трудоемкости процесса проектирования, материалоемкости модели и точности «посадки» заготовки на колодку в процессе обтяжно-затяжных операций.

В настоящее время в России из методик ручного проектирования наиболее широко используются: графокопировальная, «жесткой оболочки» и итальянская – школы «ARS Sutoria».

Графокопировальная методика проектирования была разработана Ю. П. Зыбиным в 1935–1936 годах на основе проведенных антропометрических исследований и установления четырех основных закономерностей в размерах стопы. Этот метод позволяет разработать модели обуви по усредненной развертке боковой поверхности колодки (УРК) с использованием базисных линий, отражающих определенные анатомические точки стопы, и контрольных и вспомогательных линий.

В дальнейшем эта методика была усовершенствована Общесоюзным домом моделей обуви (ОДМО): предложено для получения УРК вместо бумаги использовать футор – нетканый материал.

В начале 70-х годов прошлого века под руководством Ю. П. Зыбина во МТИЛПе разработана методика проектирования обуви по «жесткой оболочке». Данная система моделирования предусматривает получение «жесткой оболочки» из поливинилхлоридной пленки на вакуум-аппарате методом горячего вакуумного формования, или из ткани. На начальном этапе колодку «одевают» внутренними и промежуточными деталями, прикрепляют основную стельку и с «одетой» колодки получают «жесткую оболочку». На объемной «жесткой оболочке» рисуют контуры проектируемой модели, согласно эскизу, ориентируясь при этом на предварительно нанесенные на «жесткую оболочку» базисные, контрольные и вспомогательные линии. Ее надрезают, снимают с колодки и распластывают на листе бумаги, учитывая при этом степень пространственности заготовки: плоская, полуплоская, пространственная или объемная. Проектирование по методу «жесткой оболочки» предусматривает ряд корректировок, связанных с деформацией материалов при обтяжно-затяжных операциях, изменением площади «жесткой оболочки» при переносе ее с объемной колодки на лист бумаги и правильной «посадкой» заготовки на затяжную колодку в процессе производства.

Методика проектирования по «жесткой оболочке» имеет ряд преимуществ. К ним относятся соответствие контурных линий чертежа эскизным линиям и точность площадей в результате производимых корректировок. Но эта методика проектирования длительна по времени. Для объемных же заготовок «мокасин» она приемлема, так как по методике для объемных заготовок не производят длительных расчетов для корректировки контура, учитывающей

деформационные свойства материалов, а корректируют их, уменьшая площадь деталей на 3–5 % от длины заготовки.

С 1991 года в России получила распространение итальянская методика проектирования верха обуви «ARS Sutoria». Она разработана итальянским модельером Андреано Лунатти в 1962–1965 годах, основана на практическом опыте, предусматривает перенос линий модели с колодки на плоскость чертежа. Для получения УРК используется скотч-лента и выполняются внутренние надрезы на УРК для ее распластывания, что позволяет сохранить периметр УРК без изменений. В методике предусмотрена корректировка УРК в зависимости от типа обуви. Авторы итальянского метода проектирования разработали три способа получения УРК, отличающихся степенью точности.

Методики САПР верха обуви в большинстве случаев основаны на копировальном методе проектирования. Метод заключается в том, что исходными данными является поверхность колодки, которая обмеряется на цифровом измерительном устройстве (ЦИУ) с точностью до 0,1 мм, с шагом по длине и ширине 5 мм в трех координатах; с помощью соответствующего алгоритма преобразовывается в две двухкоординатные развертки наружной и внутренней боковой поверхности колодки. Усредненная развертка боковой поверхности колодки (УРК) является основой проектирования обуви.

Преимущества копировального метода заключаются в том, что многократно используется полученная УРК (пока рекомендована соответствующая колодка) и не требуется наносить рисунок будущей конструкции на сложную поверхность колодки. Это позволяет экономить время и средства.

Полученная УРК вписывается в сетку базисных и вспомогательных линий (БС) по методикам, разработанным советскими учеными. БС является исходной позицией в проектировании базовой основы (БО) восьми различных типов обуви. Алгоритмы построения БС и БО обуви могут также многократно использоваться. Каждый тип БО является основой для проектирования множества видов обуви в конкретных грундмоделях, алгоритмы которых составляются по отечественным методикам проектирования обуви с использованием инженерной графики и дифференциальной геометрии.

К полученным геометрическим контурам прибавляются технологические припуски на обработку деталей и швы. Производится корректировка контуров деталей на деформацию использованного материала. По геометрическим данным грундмодели верха проектируются детали подкладки и промежуточные детали по известным методикам проектирования. Производится проверка взаимокладываемости лекал деталей при оптимальном использовании материалов. По исходному размеру можно получить серию номеров проектируемой обуви от наименьшего до наибольшего по отечественной методике. Полученные геометрические данные следует вывести на графопостроитель для вычерчивания чертежа грундмодели или деталей обуви, или на режущее устройство для получения лекал.

4.2 Математическое обеспечение САПР верха обуви

Специфика математических моделей проектируемых объектов определяет математическое обеспечение системы и внутреннее содержание процедур взаимодействия инженера и ЭВМ.

Методы получения математических моделей можно представить двумя группами.

К первой группе относятся методы получения математических моделей элементов и макромоделей систем. Для этих методов характерно использование неформальных (эвристических) приемов и процедур. Неформальный подход используется при выборе вида математических соотношений модели, в то время как последующее определение числовых параметров модели может быть формализовано.

Ко второй группе относятся методы получения полных математических моделей систем из заданных математических моделей элементов. Эти модели могут быть полностью формализованы и инвариантны ко многим техническим объектам.

В первой группе различают теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы основаны на использовании закономерностей, характерных для моделирующего процесса. Математический аппарат этих моделей обычно составляют системы уравнений.

Экспериментальные методы основаны на использовании экспериментальных данных. К числу основных задач, решаемых при разработке математического обеспечения САПР верха обуви, относятся:

- аналитическое описание кривых конструктивных элементов деталей верха обуви;
- проектирование кривых и поверхностей интерактивными методами;
- разработка алгоритмов для расчета и вычерчивания кривых и поверхностей средствами машинной графики.

Для описания деталей верха обуви могут быть использованы: полиномиальные кривые Берштейна-Безье, полиномиальные сплайны, В-сплайны, плоские алгебраические кривые.

Конструирование деталей верха по методу Берштейна-Безье – это эвристическая процедура. На первом этапе, используя меню графического редактора, конструктор вручную делает набросок желаемой кривой. Следующий шаг заключается в корректировке формы кривой изменением положения вершин характеристического многоугольника с целью приближения к заданной. Кривые Берштейна-Безье применимы для конструирования сегментов деталей верха обуви по трем, четырем и пяти конструктивным точкам при наличии касательных и первой и последней точках.

Полиномиальные сплайны применимы для конструирования деталей верха при числе конструктивных точек больше пяти.

Для описания деталей верха, контуры которых состоят из прямолинейных

и криволинейных участков, могут быть использованы В-сплайны. Применение В-сплайнов для конструирования деталей верха обуви обусловлено следующими причинами: с помощью В-сплайнов можно описывать детали, содержащие криволинейные и прямолинейные участки и детали, имеющие точки излома, а также производить сглаживание контуров разверток колодок при аппроксимации.

Для коррекции формы кривой, описываемой В-сплайн-интерполяционной кривой, следует использовать варианты:

- изменение порядка кривой;
- введение кратных вершин, изменение числа и положения кратных вершин;
- изменение положения вершин характеристического многоугольника.

Для того, чтобы аппроксимирующий В-сплайн проходил через конструктивные точки, необходимо использовать перерасчет координат вершин характеристического многоугольника.

Плоские алгебраические кривые могут быть использованы для конструирования деталей верха с числом конструктивных точек от трех до пяти.

4.3 Программное обеспечение

Системное программное обеспечение САПР должно прежде всего удовлетворять требованиям организации в таких системах режима диалоговой обработки информации. Под прикладным программным обеспечением САПР понимают обычно набор программ, реализующих решение на ЭВМ конкретных задач конструирования или разработки технологии обработки.

Технические и программные средства САПР являются основой организации связи «человек – машина».

Для решения конкретных задач в составе САПР имеются прикладные программы, обеспечивающие обработку алфавитно-цифровой, буквенной и графической информации. Графическая информация в САПР – это все виды черно-белых и цветных изображений, описываемых линиями и плоскостями.

Для обеспечения САПР необходимой алфавитно-цифровой и графической информацией служат специализированные базы данных.

На выбор того или иного варианта внутримашинного представления могут оказывать влияние факторы, зависящие от программных и технических средств, имеющихся в распоряжении разработчика, и факторы, зависящие от пользователя системы – заказчика.

Внутримашинное отображение геометрического объекта может быть представлено в виде формализованной модели или массива числовых значений параметров, описывающих структуру и размеры объекта. При машинной обработке геометрические элементы можно разбить на семь характерных классов.

Символьная обработка представляет собой особую форму преобразования

информации.

Для трехмерных пространственных объектов характерна сложность описания, так же как и для геометрических объектов, элементы которых не могут быть описаны известными формулами аналитической геометрии.

Поверхности, которые не могут быть описаны аналитически, наиболее характерны и имеют большое значение при формообразовании в обувной промышленности, самолето-, автомобиле- и судостроении. Системы, работающие с объектами, описываемыми аналитически, имеют более широкое распространение. С точки зрения возможностей практической реализации в системах САПР предпочтительней работать с объектами, содержащими аналитически описываемые линии и поверхности.

Во многих трехкоординатных САПР объемное изделие получается в результате двухкоординатной обработки плоских поверхностей путем изменения глубины врезания и угла поворота оси вращения (инструмента или обрабатываемой детали). Объемное изделие может быть получено также в результате объединения базовых объемных элементов; при этом могут быть получены даже сложные пространственные поверхности.

Полнота ВПО при описании формы предполагает наличие исчерпывающей информации о геометрии и структуре объекта, что может оказаться необходимым при изготовлении чертежей и моделировании обработки для предупреждения столкновений инструмента с деталью и станком. Решение задач конструирования и технологической подготовки производства с применением ЭВМ предполагает переход от реального технического объекта к его кодированному описанию в памяти вычислительной машины. Такой переход осуществляется, как правило, в несколько этапов.

На первом этапе реальный пространственный объект подвергается абстракции, в результате которой определяется вербальная модель. Вербальная модель может полно или частично отражать реальный объект. Сложность вербальной модели, зависящая от сложности технического объекта и использования его описания в задачах проектирования, будет определять в дальнейшем концепцию САПР. Таким образом, вербальная модель является обобщением взглядов пользователей САПР на технический объект.

Методы, лежащие в основе концепций САПР, можно подразделить по степени сложности описания объектов на трех- и двумерные и по конструктивным элементам описания – на объемные, полигональные (поверхностные) и проволочные.

На втором этапе информационную модель получают путем формализации вербальной модели, выделяя уровни структуризации данных и их взаимосвязь. На этом этапе определяют также полноту информационной модели с учетом процессов обработки информации в задачах проектирования. Таким образом, информационная модель уточняет и структурирует эту информацию с логической точки зрения и, с одной стороны, является проблемно-ориентированной, а с другой стороны, обеспечивает эффективное управление информацией в

САПР. Отображение информационной модели в память ЭВМ называется внутримашинной моделью или внутримашинным представлением технического объекта. Внутримашинное представление объекта (ВПО) в интегрированной САПР является ядром данных, на котором реализуется планирование и внедрение задач проектирования.

Существенным моментом в этом представлении является то, что оно должно отражать характеристики не одной детали, а целого класса деталей на различных стадиях проектирования, фиксируемых в технической документации. Поскольку под техническим объектом можно понимать и деталь, и изделие, и технологическое оборудование, то необходим дифференцированный подход к описанию этих объектов. Так, внутримашинное представление детали характеризуется данными, описывающими геометрию детали, в то время как технологическое оборудование может характеризоваться также данными по технологии обработки и др. На третьем этапе осуществляется процесс отображения информационной модели во внутримашинное представление с использованием операций над ВПО или средств манипулирования в банке данных. Под операциями понимают алгоритмы, реализующие процесс моделирования и обеспечивающие управление данными.

Стандартизация так называемого системного интерфейса с внутримашинным представлением обеспечивает эффективность взаимодействия между прикладными программами и предполагает определенные соглашения о способе обращения к ВПО, о структуре данных, об операциях обработки и реализуется на определенных уровнях.

Прикладные программы

Уровень 4 Программы, реализующие проблемно-зависимые манипуляции над элементами.

Интерфейс с внутримашинным представлением

Уровень 3 Проблемно-независимые программы манипулирования элементами и отношениями структуры данных.

Уровень 2 Программы манипулирования на уровне поля.

Уровень 1 Программы манипулирования на уровне слова.

При соблюдении этих соглашений ВПО может быть реализовано на различных структурах хранения без изменения самого интерфейса.

Метод трехмерного объемного описания предполагает использование множества конструктивных объемных элементов для получения деталей произвольной формы. Элементами внутримашинного представления являются точка, контур, поверхность, элементарные и сложные тела. Эти элементы обеспечивают обработку геометрической информации для всех процессов автоматизированного проектирования.

САПР подразделяются на гибкие и жесткие системы «под ключ». И в

гибких, и в жестких системах имеются постоянные технические и программные части.

Функции, выполняемые САПР, задаются ее программным обеспечением. Операционная система должна обеспечивать прохождение пользовательских программ на имеющихся технических средствах, управлять диалогом и размещением данных. Технические возможности программного обеспечения САПР характеризуются архитектурой системы, объемами перерабатываемой информации, быстродействием, удобством эксплуатации, гибкостью, мобильностью, надежностью и уровнем стандартизации.

Удобство эксплуатации САПР в значительной степени определяется тем, как реализована связь между проектировщиком и системой. Благодаря большой наглядности, графический диалог является важнейшей формой связи «человек-машина». Графический диалог позволяет добиться оптимального разделения функций между проектировщиком и ЭВМ при одновременном улучшении качества принимаемых человеком решений.

Диалог расширяет возможности САПР. Особенно важны характеристики операционной системы, определяющей возможности диалога. Большое значение имеют также характеристики системы, определяющие передачу данных, доступ к данным и язык управления данными.

Основу гибкости САПР составляет ее общая архитектура и техника диалога, позволяющие расширить возможности программного обеспечения. Частота обращения к программам и продолжительность срока их эксплуатации зависят от мобильности программ и от использования одного из унифицированных языков программирования. Для достижения мобильности программ необходимо, чтобы система программного обеспечения не зависела от типа ЭВМ. Это может привести к возрастанию времени счета и ответа, так как в этом случае не будут использованы специфические преимущества отдельных типов ЭВМ и их внешних устройств.

При решении производственных задач можно разработать отдельные программы и затем увязать их в единую систему. Программы, составленные по такому методу, пригодны для решения простых задач, так как по мере появления новых задач программное обеспечение должно постоянно обновляться.

Можно достигнуть высокой применяемости отдельных программных модулей, если предусмотреть с их помощью решение задач в общем виде.

Возможности расширения и интерпретации программного обеспечения при создании системы зависят, кроме того, от способов сопряжения между собой отдельных программных модулей. Сопряжения обеспечиваются использованием общей базы данных или запуском подпрограмм в определенной последовательности.

Структура САПР предполагает наличие системных и прикладных программных модулей. Модульное построение программного обеспечения гарантирует возможность создания сложных систем и их последующего развития. САПР общего назначения, как бы нейтральные к объекту проектирования, не

требуют для своего создания больших затрат. Такие САПР обладают общими для всех объектов возможностями геометрических преобразований информации и общей базой данных, содержащей характеристики конструкционных материалов, инструмента и станков. Предметная САПР может быть ориентирована на конкретный объект или класс объектов. Практикой установлено, что при превращении САПР общего назначения в предметную САПР в основном возрастает доля затрат на общесистемное программное обеспечение. Существующие методы автоматизации программирования обеспечивают создание программного обеспечения предметных САПР без особых трудностей.

Преимущество специализированных или предметных САПР заключается в оптимизации программного обеспечения с учетом особенностей конкретных задач. Оптимизация программного обеспечения возможна по критериям объема программ, объема исходных данных, времени счета и вида получаемых результатов. Недостатком специализированных САПР является невозможность их использования для проектирования других объектов. Правильный выбор специализированной САПР или САПР общего назначения в каждом случае зависит от конкретных условий.

Программное обеспечение предметных САПР, ориентированных на конкретный объект, можно создавать без соблюдения принципа модульности, как неразрывное целое. Это целесообразно в основном при решении простых задач, так как расширение или адаптация такого программного обеспечения к решению других задач все равно невозможна.

При разработке программного обеспечения, ориентированного на решение широкого круга задач, целесообразно создавать отдельные программные модули, частота применяемости которых может быть достаточно высокой. В таких случаях создается двухуровневое программное обеспечение, которое подразделяется на системное и прикладное.

Системная часть используется для реализации постоянно повторяющихся процедур общей задачи, например, обеспечения доступа к ВПО, ведения банка данных и т. п. К этому же классу задач можно отнести построение сечений геометрических объектов.

Модульный принцип построения программного обеспечения может быть реализован следующим образом. Входная часть включает в себя модуль, воспринимающий входной язык, и модуль, реализующий графический диалог при построении дву- и трехмерных объектов. Специализированные программные модули обслуживают устройства ввода, обеспечивая ввод информации, ее интерпретацию и обработку, включая подготовку программ для станков с ЧПУ.

Программные модули, обслуживающие банк данных, обеспечивают работу специализированных модулей, снабжая их конструкторской и технологической информацией. Эти же модули осуществляют переработку характеристик объектов во внутримашинные представления, которые затем хранятся для дальнейшего использования. Банк данных необходим из-за большого объема информации, участвующей в работе программ. На выходе работают программ-

ные модули, обеспечивающие вывод графических изображений на чертежные автоматы или графические дисплеи, на печатающие устройства – спецификации маршрутных карт, на перфоленту или магнитные носители – программы для станков с ЧПУ.

Другая разновидность модульного принципа построения программного обеспечения – это организация ввода-вывода в банках данных, в системах «под ключ», когда одно и то же программное обеспечение, основная его часть, используется при решении широкого спектра задач от машиностроения до электроники.

Модульное построение программного обеспечения САПР, по существу, определяется задачами, решаемыми системой. На структуру программного обеспечения оказывает влияние также конфигурация технических средств. В децентрализованной САПР важно правильное распределение задач между теми или иными техническими средствами. Надежность предметной САПР решающим образом определяет ее пригодность к использованию. Здесь особенно важна наглядность обнаружения ошибок при вводе исходных данных. Полностью исключить ошибки в программах невозможно, однако пользователь вправе рассчитывать на то, что он не встретится с ошибками, о которых сама программа его не проинформирует.

Стандартизация программного обеспечения САПР находится пока что в начальной стадии. Уже действуют в рамках международной и национальной стандартизации язык Фортран, промежуточный язык CDLATA для систем подготовки управляющих программ станков с ЧПУ, синтаксический язык описания геометрии обрабатываемых деталей АРТ. Известны стандарты GKS и IGES для графического описания деталей и их внутримашинного представления. Заключены международные соглашения по банкам данных. Дальнейшее развитие стандартизации необходимо, так как только благодаря стандартам может быть обеспечено создание программного обеспечения как товара, который может передаваться для использования в различных САПР. Ограничения, накладываемые языком Фортран в части возможностей структурного программирования, динамических полей данных, рекурсивных и параллельных процессов, до сих пор не являлись препятствием, так как транслятор с Фортрана имеется почти на любой ЭВМ.

Эффективность программного обеспечения САПР может быть повышена путем включения программ, написанных на ассемблере и использующих имеющийся в операционных системах прямой доступ к устройствам графического ввода-вывода. Языки Бейсик, ПЛ-1, Алгол-68 и Паскаль до последнего времени в программном обеспечении САПР использовались редко. Функции, выполняемые САПР, не зависят от языков программирования и могут быть описаны словесно или в виде структурных схем.

Графические внешние устройства программным путем реализуют следующие процедуры: перемещение объекта по экрану, вращение, создание окон, масштабирование, зеркальное отображение.

Внутримашинное представление объекта также есть результат вычислений. База данных, содержащая ВПО, имеет локальные интерфейсы с программами доступа, которые и осуществляют поиск, чтение, корректировку и удаление элементов изображений и их связей. Сами внутримашинные представления, содержащиеся в базе данных, могут быть использованы в различных программах.

Рабочие чертежи и управляющие программы могут быть генерированы из элементов внутримашинных представлений, содержащихся в базе данных. Многие дву- и трехмерные графические системы имеют выход на системы подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Простановка размеров на чертежах может осуществляться автоматически или полуавтоматически, когда проставляемые размеры высвечиваются на экране дисплея, а оператор сам определяет место простановки размера на поле чертежа. Численные значения размеров и изображения размерных стрелок генерируются на экране автоматически. Допуски на размеры задаются в режиме диалога при размещении размерных стрелок. Для выявления внутренней формы деталей на экране могут быть отображены сечения в разных плоскостях: при этом линии невидимого контура затемняются на экране автоматически или оператором с помощью соответствующего программного обеспечения. Дальнейшее развитие работ в области создания САПР, конструирующих различные объекты, требует создания проблемно-ориентированных языков описания конструкций и технологических процессов изготовления. В технологических САПР должно быть увеличено число промежуточных графических элементов, благодаря которым упрощается графический диалог при разработке технологии механической обработки.

Информационно-программное обеспечение диалога.

Идеология построения инструментальных средств для проектирования диалога, в отличие от большинства традиционных методов построения диалога, предусматривает формальное описание диалогового сценария, отделенного от содержательной части прикладной системы, что дает удобную возможность его модификации. Тем самым обеспечивается адаптивность системы.

При разработке описания сценария проектирования предпочтительно графическое представление сценария диалога. Логика описания диалога определяется структурой типовых узлов сценария. Для интерпретации диалога могут быть использованы следующие управляющие конструкции: диалоговый повтор, диалоговое ветвление, диалоговый мультицикл.

4.4 Информационное обеспечение САПР обуви

Банки данных предназначены для хранения структурированных данных и использования их при решении широкого спектра задач. Пользователи при решении своих задач реализуют доступ к данным не простой адресацией, а через описание данных на более высоком логическом уровне, поскольку функции ор-

ганизации, хранения и управления данными на физических носителях возложены на банк данных.

Банк данных представляет собой совокупность баз данных и СУБД. База данных содержит все необходимые прикладные и управляющие данные, которые могут быть использованы в процессах накопления, хранения и поиска информации. Банк данных может содержать одну или несколько баз данных, используемых в процессах автоматизированного проектирования.

Существенной предпосылкой для использования банка данных как компонента интегрированной САПР является разработка обобщенных информационных моделей для различных технических объектов, что позволит обеспечить единообразное представление и обработку данных в задачах конструирования и технологической подготовки производства. В системах автоматизированного проектирования необходимо иметь по крайней мере четыре типа баз данных: административная база данных; технологическая база данных; база данных описания объекта проектирования; рабочая база данных.

Административная база данных – это, в общем случае, архив, в котором хранятся различные документы, такие, как описание чертежей, технологические карты, спецификации. Она заменяет обычный архив и реализует функции накопления, хранения, поиска и репродуцирования документов.

Технологическая база данных содержит данные, относящиеся к описанию технологических процессов и их поддержке к ним.

В САПР верха обуви банк представляет собой совокупность БД и СУБД. В САПР верха обуви предусматривается четыре типа БД:

- 1) административная база данных (архив), в которой предлагается хранить различные документы, такие, как описание чертежей, спецификации и т.д.;
- 2) технологическая база данных, содержащая данные описания технологических процессов и их поддержки;
- 3) база описания объекта проектирования, содержащая все данные, необходимые для его полного отражения в памяти ЭВМ;
- 4) рабочая БД содержит временные промежуточные данные, которые вырабатываются в процессе выполнения программных модулей САПР.

Вся информация хранится в виде системы взаимосвязанных таблиц.

Для эффективного функционирования программного обеспечения САПР необходима соответствующая организация данных, которая основана на модели объекта проектирования (внутримашинное представление) и может быть реализована средствами банка данных.

Под организацией данных в САПР в широком смысле понимают управление данными в процессе проектирования, а в узком смысле – моделирование структур данных и организацию их хранения.

Традиционно выделяют следующие уровни организации данных: бит, знак, поле, сегмент, запись, файл, база данных.

Поле – это упорядоченная последовательность знаков. Поле имеет имя и значение определенной длины, причем имя может косвенно указывать на тип

содержащегося в поле значения.

Сегмент состоит из нескольких полей, связанных логической зависимостью, и имеет уникальное имя.

Запись состоит из нескольких полей или сегментов, число которых определяет размер записи, а состав – тип записи. Каждый тип записи также должен быть поименован.

Файл или совокупность данных есть множество записей, упорядоченных по определенному признаку. Признак упорядочивания (ключ) служит для идентификации и структуризации записей массива. Каждый массив должен иметь уникальное имя. Тогда организация данных будет отражать связи между массивами или соответственно между типами записей данных. Ключ записи позволяет осуществить прямую адресацию в среде хранения.

Как правило, организация данных может быть сведена к какой-либо структуре хранения данных. Особым случаем древовидных структур хранения являются бинарные деревья, в которых каждая вершина связана только с двумя вершинами более низкого уровня. В каждой вершине бинарного дерева хранятся значение вершины и указатели на нижестоящие вершины, причем значениями вершины может быть как первичный ключ и адрес соответствующей физической записи, так и полная запись. Если хранение данных реализуется в конечных вершинах, называемых листьями, то говорят, что поиск в бинарном дереве ориентирован на листья, в противоположном случае – на вершины. Обобщением понятия бинарного дерева являются деревья, в которых из каждой вершины могут исходить более двух ветвей. Такие деревья называют также многоходовыми. Эти специальные многоходовые деревья получили название В-деревьев, по имени специалистов Бауера и Крайта, которые в начале 70-х годов провели исследования структуры таких деревьев. Каждая вершина В-дерева состоит из совокупности значений первичного ключа, указателей индекса (для перехода на нижележащий уровень) и ассоциированных данных, которые являются указателями физического местоположения данных, располагающихся в отдельной области памяти с произвольным доступом. Операции над такими деревьями должны строго контролироваться.

На организацию данных большое влияние оказывают процессы их обработки, реализованные в виде прикладных программ. Такая тесная зависимость между данными и прикладными программами приводит к большим изменениям прикладных программ при попытке реструктуризации данных [4,5]. Этот недостаток может быть преодолен путем организации банка данных, который позволяет реализовать независимость прикладных программ от данных. Под банком данных понимают совокупность баз данных и систем; управление базами данных (СУБД).

Множество всех записей данных с соответствующей структурой образуют состояние данных. Под базой данных понимают объединение всех физических состояний данных.

4.5 Лингвистическое обеспечение

К компонентам лингвистического обеспечения относятся: язык проектирования (ЯП), входной язык, вспомогательные языки.

Как показал анализ, наиболее подходящим для выполнения системных работ является язык, удовлетворяющий следующим требованиям ЯП:

- базирование на терминах, принятых в конструировании обуви;
- обеспечение описания управления и контроля процесса проектирования;
- обеспечения описания управления и контроля процесса проектирования;
- возможность выдачи пользователю справок, инструкций, сообщений об ошибках;
- использование механизма выбора альтернативных директив из набора;
- представление ЯП в виде набора директив для формирования пользователем модели объекта проектирования и ее анализа.

СУБД образует единство методов управления базой данных и описания ее логической структуры. Эти методы реализованы с помощью алгоритмов доступа, обработки и управления. Также СУБД представляет язык определения данных (ЯОД) и язык манипулирования данными (ЯМД). Под ЯМД понимают языки, определенные как расширение конкретного языка программирования или как самостоятельные языки, позволяющие обрабатывать прикладные данные путем включения в программы специальных команд. С помощью ЯМД прикладной пользователь может считывать, изменять, добавлять и удалять данные в пределах установленной ЯОД структуры данных.

Язык определения данных разделяется на языки, описывающие логическую и физическую структуры данных. С помощью физического ЯОД описывают размещение файлов в физической среде хранения, называемое описанием физической базы данных. Отображение логической структуры данных на физическую среду хранения достигается сопоставлением имен записей и полей данных, используемых в схеме базы данных с именами, описывающими физическую базу данных.

Как правило, описание логической и физической баз данных выполняет администратор базы данных.

4.6 Техническое обеспечение

В качестве процессора в САПР могут быть использованы ЭВМ любой марки, которые могут работать отдельно или в составе вычислительной сети. Под периферийными устройствами обычно понимают алфавитно-цифровые или графические терминалы-дисплеи, предназначенные для обеспечения связи «че-

ловек-машина» путем ввода-вывода алфавитной, цифровой и графической информации.

К техническим средствам САПР относятся ЭВМ с внешними устройствами. Производительность ЭВМ, ее архитектура, связь с другими ЭВМ, количество и номенклатура внешних устройств определяют техническую производительность САПР. Важнейшие характеристики ЭВМ: максимальный объем памяти, производительность и эксплуатационные возможности, предоставляемые операционной системой. Для подключения внешних устройств изготовители ЭВМ (или изготовители периферийного оборудования) поставляют специальное программное обеспечение, учитывающее специфику операционной системы и системы команд ЭВМ.

При выборе ЭВМ для САПР учитывают следующие критерии: первоначальную конфигурацию (первичные капитальные затраты); обновление конфигурации (дополнительные капитальные затраты); расширение конфигурации (дополнительные капитальные вложения).

С точки зрения применимости САПР наибольший интерес представляют следующие параметры технических средств: производительность, экономичность, удобство обслуживания, надежность, долговечность, занимаемая площадь и время ответной реакции.

Аппаратура САПР подразделяется на три функциональные группы: терминалы пользователя; системы связи; центральная вычислительная система.

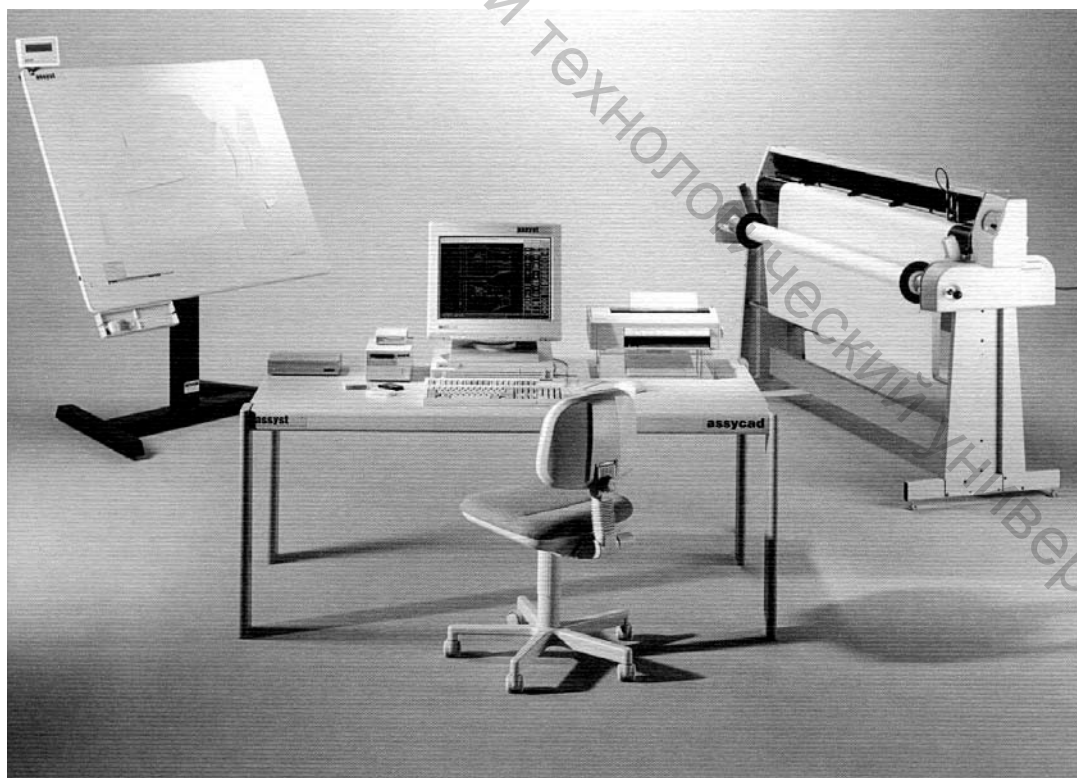


Рисунок 4.1 – Рабочее место оператора САПР

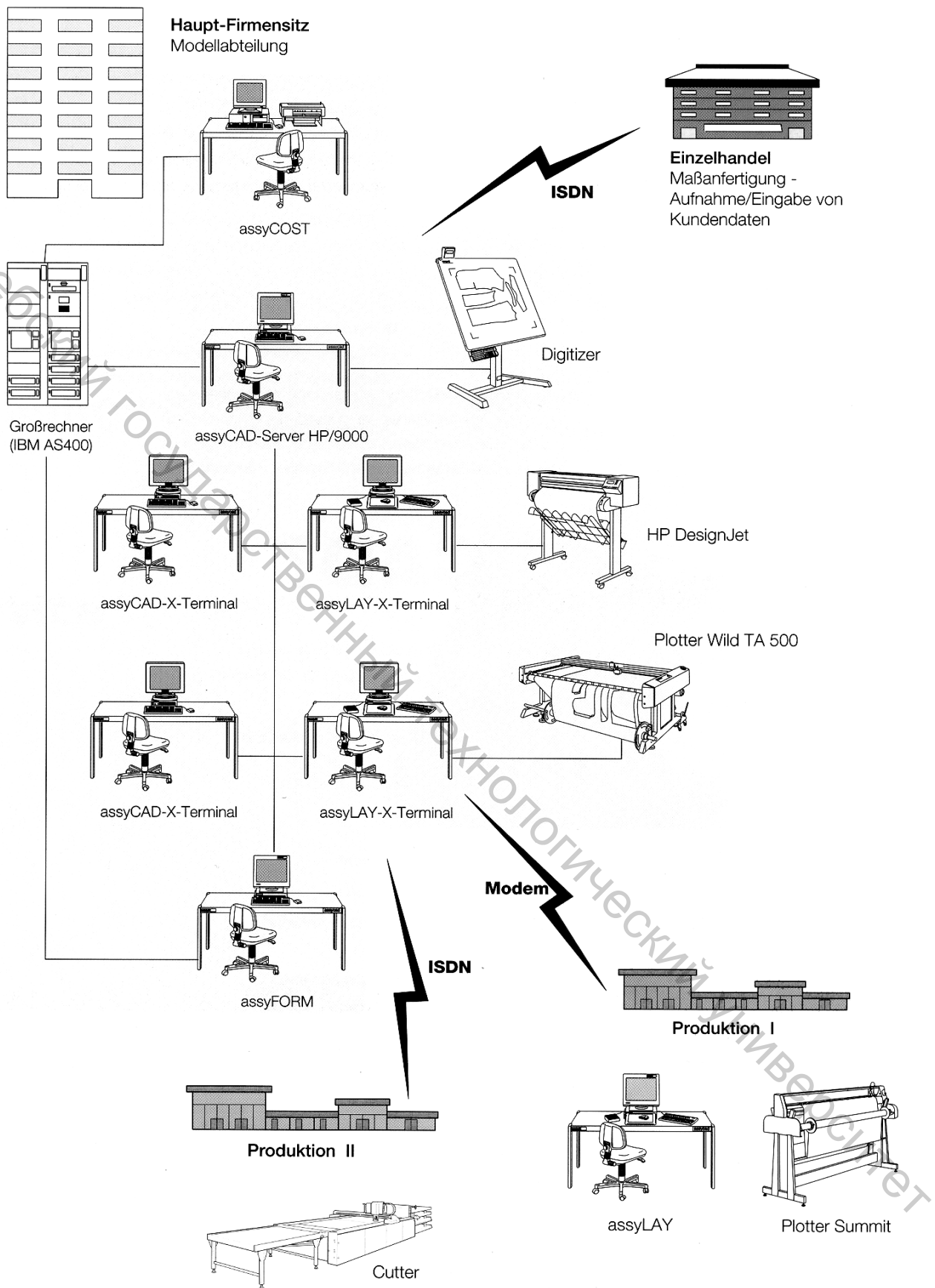


Рисунок 4.2 – Организация связей комплекса САПР

В наиболее распространенных конфигурациях периферийные устройства присоединяются к процессору напрямую или с помощью специальных устройств сопряжения.

Периферийные устройства подключаются к процессору через канал передачи данных. Управление отдельными устройствами осуществляет устройство управления – мультиплексор. В отдельных случаях эту функцию выполняет дисплейный процессор, на который возлагается задача накопления и упорядочения графических данных, что позволяет разгружать центральный процессор, занятый вычислениями, связанными с преобразованием координат контуров геометрических фигур. Рабочие места пользователей САПР в этом случае также разгружают центральный процессор.

При определении состава технических средств САПР исходят из требований экономичности системы и соображений удобств пользователя.

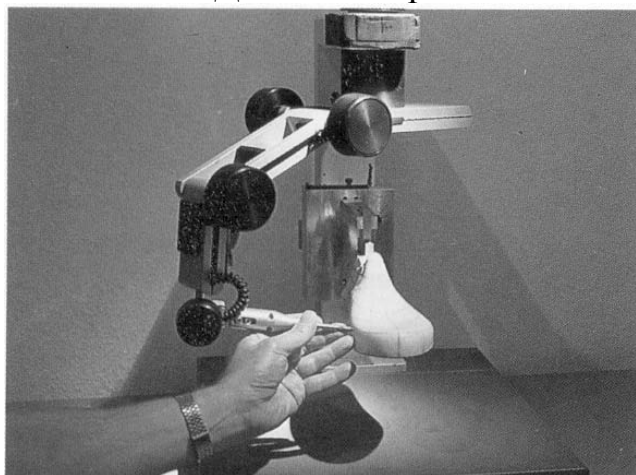
Устройства ввода. Мышь. Различают только по сервису (кнопки). Количество кнопок: 2, 3, 16, 40, 64. Мышь не связана с физическими координатами объекта, который рисуют.



Диджитайзер



Сканирующее устройство



3D оцифровщик



3D сканер

Рисунок 4.3 – Устройства ввода информации

Диджитайзер-оцифровщик, “сколка”. Различаются по принципу считывания информации: на основе индуктивности, на основе наведенной ЭДС, оптические – основаны на том, что вместо катушки ставится источник света, а поверхность разрифлена, на основе наведенной радиации (очень высокая степень считывания).

Системы автоматизированного проектирования в обувном и швейном производстве снабжаются дорогостоящими дигитайзерами для ввода графической информации контуров шаблонов и лекал. При этом точность ввода зависит не только от разрешающей способности дигитайзеров, но и, в большей степени, от точности работы руки и глаза оператора. К тому же работа по вводу информации достаточно утомительна и занимает много времени.

Вместе с тем, в учреждениях и конструкторских бюро, связанных с обработкой бумажных документов, получили широкое распространение недорогие планшетные сканеры. Обычно они используются для ввода графической и текстовой информации. Однако, по нашему мнению, круг задач, решаемых при помощи сканера, может быть значительно расширен, причем именно для целей САПР в легкой промышленности. Например, сканер формата А3 позволил бы вводить лекала деталей обуви сложной конфигурации более быстро и точно чем дигитайзер. Обходиться в специальных системах САПР без бумажных носителей в настоящий момент не представляется возможным, во-первых, по причине сложности черчения исходных форм на экране компьютера, во-вторых, из-за недостаточной квалификации пользователей этих систем.

На данный момент обычный планшетный сканер формата А4 позволяет сканировать изображение с точностью порядка 0,01 мм. Недостатком использования сканера является лишь растровый формат вводимой информации. Поэтому для использования файлов сканирования в системах САПР требуется распознавание и перевод изображений контуров в векторную форму.

В последние годы появились системы САПР, ориентированные не только на массовое производство обуви, но и на индивидуального потребителя. Для того, чтобы получить полную информацию о размерах, форме стопы и голени заказчика созданы 3D сканирующие устройства проходного или туннельного типа.

При решении задачи комплексного моделирования деталей обуви на стадии конструкторско-технологической подготовки производства в качестве основного носителя исходных данных о форме и размерах объекта выступает затяжная колодка. От того, насколько точно компьютерная модель будет отображать её реальную форму и размеры, зависит эффективность последующих стадий разработки конструкций: эскизирования, получения условной развертки боковой поверхности колодки и следа колодки, построения шаблонов деталей. Для ввода информации об исходных параметрах базовой колодки применяются 3D оцифровщики.

Устройства вывода. Применяются плоттеры (графопостроители) двух типов: планшетные и рулонные. Все устройства имеют область рисования и об-

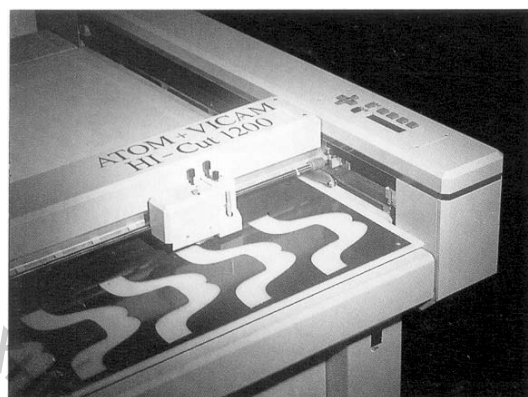
ласть вывода. Область рисования определяется физическими и техническими характеристиками устройства. По размерам ориентируется на стандарты в стране, в мире (A4, A3, A1, A0). САПР требует в качестве средств вывода устройства быстрой печати (400–1200 строк в минуту).

С помощью графопостроителя можно вычерчивать различные кривые, необходимые для изготовления технологической оснастки. Эти же данные могут использоваться для управления швейными автоматами, фрезерными станками с ЧПУ, изготавливающими кассеты для швейных автоматов, колодки или пресс-формы.

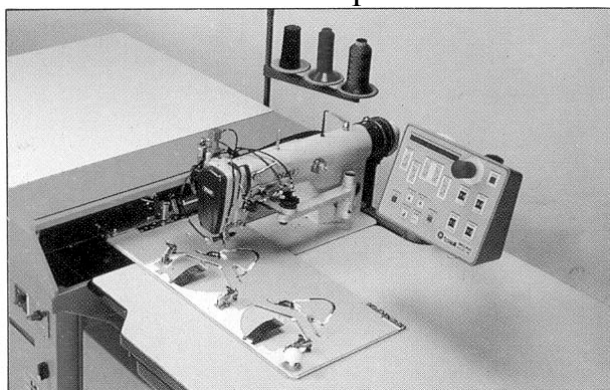
Устройства для раскраивания шаблонов (режущие плоттеры). Шаблоны могут вырезаться или фрезероваться в зависимости от толщины и твердости материала. Одновременно производится их маркирование (наносится номер модели, площадь шаблона и т. д.). При замене режущего инструмента на пишущий работают как графопостроители. Удержание материала осуществляется за счет отсоса воздуха или электростатически.



Плоттер



Режущий плоттер



Швейный автомат с ЧПУ



Фрезер с ЧПУ

Рисунок 4.4 – Устройства вывода информации

Устройства для изготовления резаков. Работа установки для выравнивания и отрезания заготовки резака из ленточной стали по размеру управляется модулем системы Padsy-Gut-Moduls.

Система для раскроя кож. Раскрой начинается после того, как получено изображение модели на экране. В процессе выполнения раскроя компьютер подсчитывает количество выкроенных деталей. Кожу укладывают на стол с шероховатой пластиковой поверхностью и накрывают прозрачной пластиной из ПВХ, прижимающей кожу с помощью вакуума. Пороки, имеющиеся на коже, отмечают фломастером, после чего специальное устройство считывает эту информацию и передает компьютеру. Одновременно квалифицированный оператор подбирает лекала и размещает их на коже, изображение кожи с лекалами индицируется на экране, после чего информация передается раскройному устройству, и производится раскрой кожи.

Лекция 5. Обработка геометрических данных. Общие положения. Введение в векторную графику

Прежде чем начать разговор о векторной графике, необходимо совершить небольшой экскурс в историю перехода от простых математических вычислений к векторным графическим технологиям.

С появлением компьютеров счастливые обладатели этих замечательных устройств начали искать им применение. Вначале компьютеры использовались исключительно для расчетов, т. е. как универсальная счетная машинка. С появлением более производительных процессоров и архитектур компьютеры стали применять для решения других задач, более сложных и требующих немалых системных ресурсов. Развитие компьютерной техники активно стимулировало программистов к улучшению интерфейса в программах, и вот результат – появление операционной среды Windows с ее графическим интерфейсом. В связи с этим возникло множество программ, назначением которых была работа с графикой.

Как и следовало бы предположить, сколько программ – столько и графических форматов. И действительно, для хранения изображений их существует большое количество. Все они делятся на два основных вида: растровый и векторный.

В векторном формате изображение задается как совокупность отдельных объектов, описанных математически (например, как векторы на плоскости), а в растровом – по точкам, как мозаика.

Чтобы лучше понять разницу, можно привести пример, как может быть описан один и тот же отрезок прямой:

- в векторном формате – заданы координаты начала и конца, цвет и толщина;
- в растровом формате – заданы координаты каждой точки, входящей в этот отрезок, и ее цвет.

Векторный формат более компактный, но он совершенно непригоден для хранения аналоговых изображений, например фотографий. В этом формате за-

давать их математически было бы очень громоздко, поэтому гораздо проще использовать представление аналоговой графики в растровом виде. А вот рисунки и чертежи гораздо удобнее и практичнее делать именно в векторном виде. Его основными достоинствами являются следующие параметры:

- изменение масштаба без потери качества и практически без увеличения размеров исходного файла;
- огромная точность (до сотой доли микрона);
- небольшой размер файла по сравнению с растровыми изображениями;
- прекрасное качество печати;
- отсутствие проблем с экспортом векторного изображения в растровое;
- возможность редактирования каждого элемента изображения в отдельности.

Основные недостатки:

- практически невозможно экспортировать из растрового формата в векторный (можно, конечно, трассировать изображение, хотя получить хорошую векторную картинку нелегко, когда графика черно-белая, и почти невозможно, если изображение цветное);
- невозможно применение обширной библиотеки эффектов, используемых при работе с растровыми изображениями.

Интерактивная машинная графика занимает центральное место в процессах конструирования и технологической подготовки производства. Предметом машинной графики являются представление и обработка графической информации с применением ЭВМ. В настоящее время разработано большое количество программ, используемых в автоматизированном проектировании. В качестве примера можно привести программы для определения норм времени на обработку, распределения количества проходов, а также программы управления движением режущего инструмента для станков с ЧПУ.

На этапе математической обработки и хранения геометрической информации о лекалах обувных изделий выполняются следующие задачи:

- математическое описание контуров лекал в удобном и компактном виде, основанное на использовании методов аппроксимации;
- геометрическое преобразование плоскостного отображения лекал из одной формы в другую, включающее операции сдвига изображений, сжатия или растяжения, поворота, отсечения части изображения, перекося и т. д.

Математическим аппаратом для решения задач геометрического проектирования является вычислительная геометрия.

Графическая информация, используемая в САПР, предназначена для описания и конструирования внешних геометрических форм проектируемого объекта.

При проектировании новых изделий реальному объекту ставится в соответствие модель, над которой могут быть осуществлены преобразования с использованием вычислительных методов.

В традиционной практике проектирования конструктор имеет дело с дву-

мерным представлением объектов в виде чертежей. При автоматизированном проектировании он может получать как наглядные объемные изображения, так и рабочие чертежи.

Из изложенного выше следует, что графическая обработка данных опирается на методы вычислительной математики. Эти методы позволяют представить геометрические зависимости в виде соответствующей модели и являются инструментом для ее интерпретации и модификации.

Под геометрическими объектами понимаются геометрические образы, которые следует рассматривать как множество точек. Данное множество – это объединение всех точек, удовлетворяющих определенному геометрическому свойству.

Все геометрические объекты можно разделить на аналитически описываемые и аналитически неопределяемые объекты. Например, к аналитически описываемым геометрическим объектам относятся точка, прямая, отрезок, эллипс, окружность, прямоугольник, цилиндр, сфера, параллелепипед, эллипсоид. К аналитически неопределяемым геометрическим объектам относятся геометрические объекты, имеющие вид произвольной кривой или изогнутой поверхности.

В автоматизированном проектировании наиболее часто используются методы начертательной, аналитической, проективной и дифференциальной геометрии.

В начертательной геометрии трехмерные объекты отображаются на плоскость. Предметом аналитической геометрии является исследование геометрических объектов с применением вычислительных методов, а в дифференциальной геометрии анализируются свойства геометрических фигур, которые описываются дифференцируемыми функциями или уравнениями. В проективной геометрии изучаются свойства элементов геометрических образов, которые сохраняются при проецировании.

К специальным разделам аналитической геометрии относятся такие разделы, как геометрия множеств, численная геометрия и алгебраическая геометрия. В геометрии множеств рассматриваются методы, в основе которых лежит теория выпуклых тел. Особенность этих методов заключается в оперировании непосредственно геометрическими объектами при исключении лишних действий, выполняемых при использовании аналитических вспомогательных средств. Численная геометрия применяет результаты теории выпуклых тел для решения теоретико-числовых проблем. Алгебраическая геометрия изучает кривые и поверхности общего вида в трехмерном пространстве.

В геометрии под топологическим отображением понимается однозначное непрерывное отображение одного геометрического объекта в другой, для которого обратное отображение также является непрерывным. Геометрический объект называется связанным, если кривая, соединяющая две любые точки этого объекта, целиком принадлежит объекту. Геометрический объект называется односвязным, если любая замкнутая кривая, находящаяся в нем, может стяги-

ваться внутри этого объекта в точку. Не все геометрические объекты на плоскости являются односвязными, потому что замкнутые кривые, которые охватывают отверстие, не могут стягиваться в точку внутри таких объектов. Напротив, в случае пространственных геометрических объектов поверхностная односвязность исключает именно отверстия, а не полости. Под топологическими свойствами понимают свойства, зависящие только от отношений связности.

5.1 Аналитически описываемые геометрические объекты

В аналитической геометрии каждой точке поставлены в соответствие числа, которые называют координатами этой точки. Кривая представляет собой множество точек, координаты которых удовлетворяют определенным соотношениям. Для определения декартовой прямоугольной системы координат необходимо зафиксировать в пространстве исходную точку – начало координат (рисунок 5.1). Три координатные оси выбираются попарно перпендикулярно друг к другу. Тогда каждой точке в пространстве однозначно соответствуют три действительных числа, которые определяют проекцию этой точки на координатные оси (рисунок 5.2).

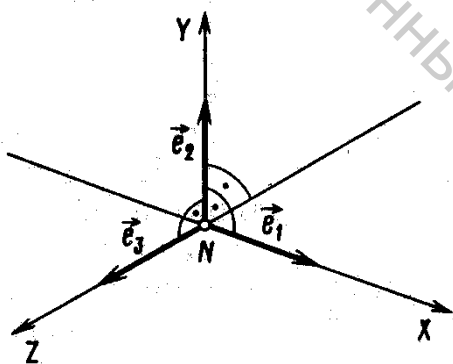


Рисунок 5.1 – Правая прямоугольная система координат

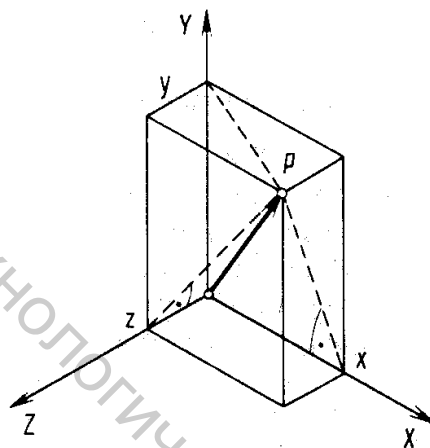


Рисунок 5.2 – Точка в декартовой системе координат

Расстояние между точкой с координатами x , y , z и началом координат находится по формуле:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (5.1)$$

В декартовой прямоугольной системе координат на плоскости точке ставится в соответствие пара действительных чисел.

Полярная система координат задается некоторой точкой, называемой полюсом, исходящим из этой точки лучом (полярная ось) и масштабом для измерения длин. Чтобы определить положение точки в полярной системе координат, нужно задать угол, на который необходимо повернуть числовую ось в по-

ложительном направлении (против часовой стрелки) до совмещения с этой точкой, а также расстояние от этой точки до полюса, измеренное на числовой оси (рисунок 5.3).

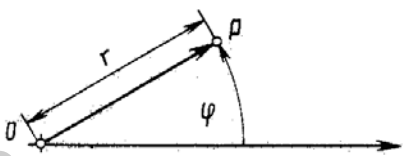


Рисунок 5.3 – Точка в декартовой системе координат

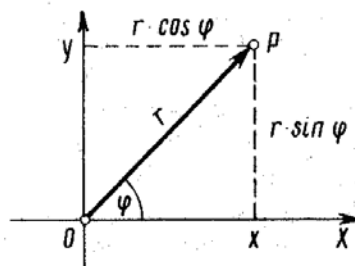


Рисунок 5.4 – Зависимость между декартовой и прямоугольной системой координат

Зависимость между декартовыми прямоугольными (декартовыми) и полярными координатами имеет следующий вид (рисунок 5.4):

$$\cos \varphi = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5.2)$$

$$\sin \varphi = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (5.3)$$

Однозначное задание точки на плоскости и в пространстве соответственно парой или тройкой чисел приводит к понятию вектора. Наряду с физическим смыслом вектора как направленной величины вектор характеризует взаимное положение точек относительно друг друга. Например, на плоскости вектор v определяется разностью координат направленной пары точек $P_A(x_A, y_A)$ и $P_E(x_E, y_E)$ (рисунок 5.5). В пространстве вектор определяется тройкой чисел.

Векторы, закрепленные в начальной точке, называются радиус-векторами. Векторы, расположение которых на плоскости или в пространстве может быть произвольным, называются свободными (рисунок 5.6).

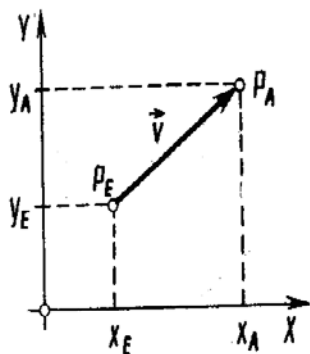


Рисунок 5.5 – Задание вектора

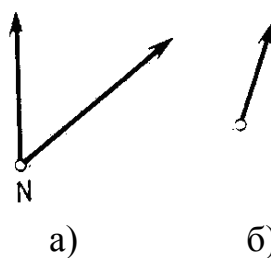


Рисунок 5.6 – Закрепленные (а) и свободные векторы (б)

Так как на плоскости или в пространстве векторы задаются соответственно парой или тройкой чисел, то операции над векторами сводятся к операциям над действительными числами.

Коротко определим некоторые из этих операций.

Пусть заданы два вектора a и b с координатами (a_1, a_2, a_3) и (b_1, b_2, b_3) . Тогда сумма и разность векторов a и b определяется следующим образом:

$$c = a + b = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ a_2 + b_2 \\ a_3 + b_3 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$c = a - b = \begin{pmatrix} a_1 - b_1 \\ a_2 - b_2 \\ a_3 - b_3 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

Различают скалярное произведение двух векторов:

$$a \cdot b = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3, \quad (5.6)$$

и векторное произведение двух векторов:

$$c = a \times b = \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

При этом вектор c перпендикулярен векторам a и b , а векторы a, b образуют правую систему по правилу «правой руки» (рисунок 5.7)

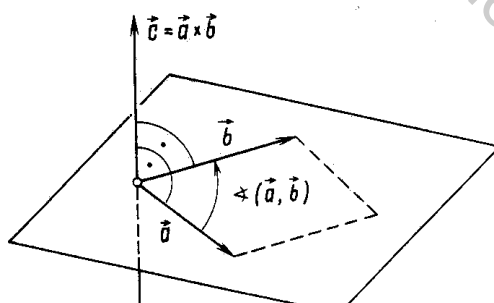


Рисунок 5.7 – Векторное произведение $a \cdot b$

Длина вектора a определяется по формуле:

$$|a| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}. \quad (5.8)$$

Вектор называется единичным, если его длина равна единице. На плоскости с помощью векторов a и b можно построить другие векторы в виде

$$d = ma + nb, \quad (5.9)$$

где m и n – действительные числа.

Вектор d является линейной комбинацией векторов a и b на плоскости.

Соответственно вектор d является линейной комбинацией векторов a , b и c в пространстве:

$$d = la + mb + nc, \quad (5.10)$$

где l , m , n – действительные числа.

Формы задания прямой на плоскости. В начертательной геометрии положение прямой однозначно определяется проекциями двух ее точек.

В аналитической геометрии на плоскости прямая определяется точками P_1 и P_2 , лежащими на ней. Уравнение прямой, проходящей через две точки, имеет вид:

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (5.11)$$

Прямая, проходящая через данную точку в заданном направлении, определяется уравнением

$$y - y_1 = m(x - x_1), \quad (5.12)$$

где m – тангенс угла наклона между этой прямой и положительным направлением оси X ;

x_1 и y_1 – координаты точки P_1 (рисунок 5.8).

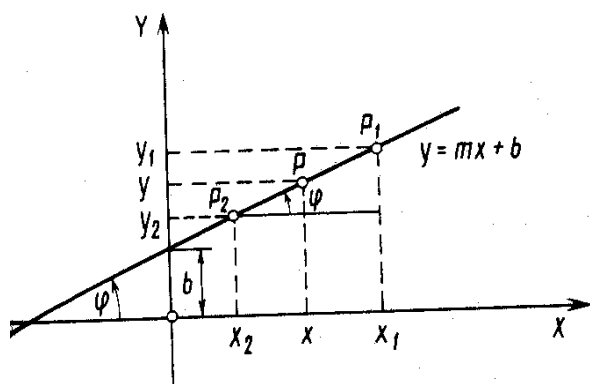


Рисунок 5.8 – Управление прямой на плоскости

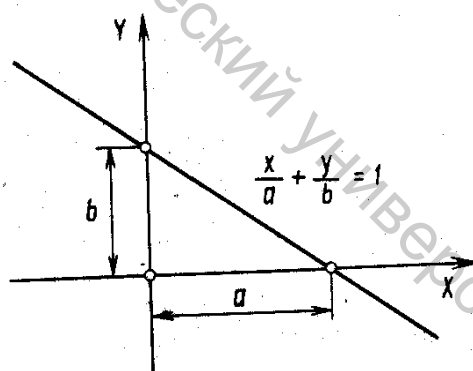


Рисунок 5.9 – Управление прямой в отрезках

Из этого уравнения можно получить уравнение прямой в декартовой

нормальной форме:

$$y = mx + b. \quad (5.13)$$

Уравнение прямой в отрезках имеет вид (рисунок 5.9):

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1. \quad (5.14)$$

Уравнение прямой в Гессовой нормальной форме имеет вид (рисунок 5.10):

$$\frac{mx + ny}{\sqrt{m^2 + n^2}} = \frac{c}{\sqrt{m^2 + n^2}}. \quad (5.15)$$

Формы задания прямой в пространстве. В аналитической геометрии в пространстве прямая, проходящая через данную точку в заданном направлении, определяется уравнением (рисунок 5.11):

$$x = x_1 + \lambda a, \quad (5.16)$$

где x_1 – радиус-вектор заданной точки на прямой;
 λ – любое действительное число.

Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки, имеет вид (рисунок 5.12):

$$x = x_1 + \lambda (x_2 - x_1), \quad (5.17)$$

где x_1, x_2 – радиус-векторы двух заданных точек на прямой;
 λ – любое действительное число.

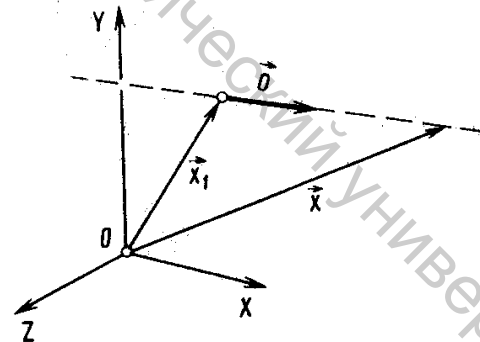
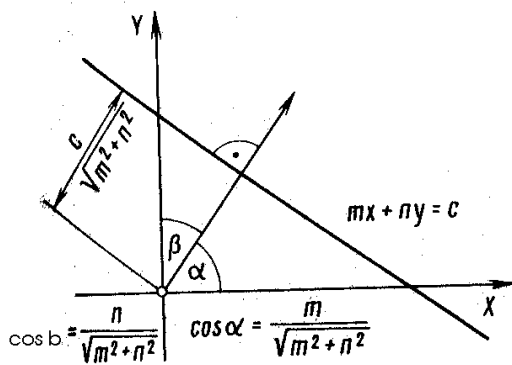


Рисунок 5.10 – Управление прямой в Гессовой нормальной форме

Рисунок 5.11 – Управление прямой в пространстве

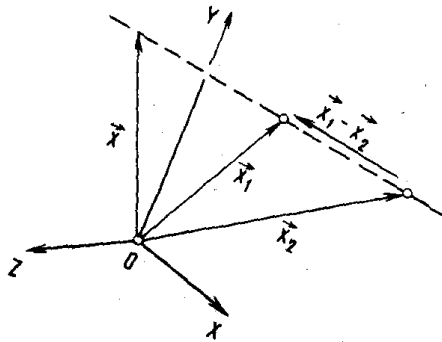


Рисунок 5.12 – Управление прямой, проходящей через заданные точки

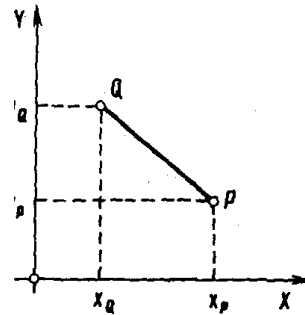


Рисунок 5.13 – Отрезок

Геометрические объекты на плоскости. Лучом называется множество всех точек на прямой, находящихся по одну сторону от заданной точки, включая и эту точку.

Отрезком PQ называется множество всех точек на прямой, находящихся между точками P и Q , включая и эти точки. Длиной отрезка PQ называется расстояние между точками P и Q (рисунок 5.13):

$$PQ = \sqrt{(x_Q - x_P)^2 + (y_Q - y_P)^2}. \quad (5.18)$$

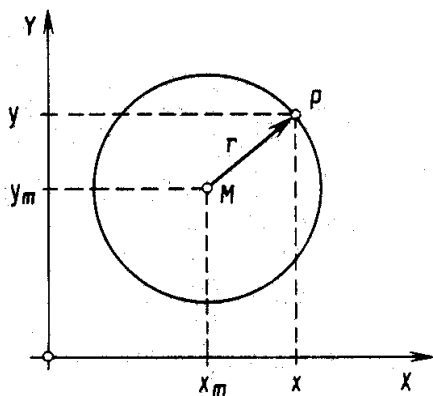


Рисунок 5.14 – Задание окружности в общем виде

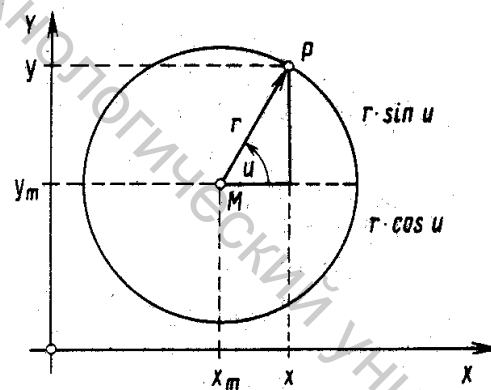


Рисунок 5.15 – Параметрическое задание окружности

Окружность есть геометрическое место точек на плоскости, находящихся на одинаковом расстоянии (радиус) от фиксированной точки (центр). Дугой называется часть окружности.

В аналитическом виде окружность с центром (x_m, y_m) и радиусом r задается уравнением следующего вида (рисунок 5.14):

$$r^2 = x^2 + y^2 - 2xx_m - x_m^2 + y_m^2. \quad (5.19)$$

Если центр окружности совпадает с началом координат, то получим каноническое уравнение окружности:

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (5.20)$$

Уравнение окружности в полярных координатах записывается в следующем виде:

$$r = R, \quad 0 < \varphi < 2\pi. \quad (5.21)$$

Параметрическая форма задания окружности с центром (x_m, y_m) и радиусом r выглядит следующим образом (рисунок 5.15):

$$x = x_m + r \cos u; \quad (5.22)$$

$$y = y_m + r \sin u, \quad (5.23)$$

где $0 \leq u < 2\pi$.

Аналитическая форма задания окружности определяет точки окружности в неявном виде и не дает четкого представления о расположении окружности относительно системы координат. Напротив, используя параметрическую форму задания окружности, можно определить точки окружности для любого значения параметра u , находящегося в пределах от 0 до 2π . Кроме того, параметрическая форма устанавливает определенную ориентацию окружности, которая соответствует возрастающим значениям параметра u .

К недостаткам параметрического задания кривой следует отнести его неоднозначность. Так как параметр выбирается в значительной степени произвольно, то кривая не имеет единственного параметрического представления. Например, если $u = \Phi(t)$ является функцией преобразования параметра, то для кривой $x = x(u)$, $y = y(u)$ можно ввести новую параметризацию с помощью уравнений $x = x(\Phi(t))$, $y = y(\Phi(t))$.

Для указанного выше параметрического задания окружности преобразование параметра с использованием трансцендентной тригонометрической функции задается формулой $-\infty < t < +\infty$.

Тогда параметрическое задание окружности с центром в начале координат имеет вид (рисунок 5.16):

$$x = x(t) = r \frac{1-t^2}{1+t^2}, \quad (5.24)$$

$$y = y(t) = r \frac{2t}{1+t^2}. \quad (5.25)$$

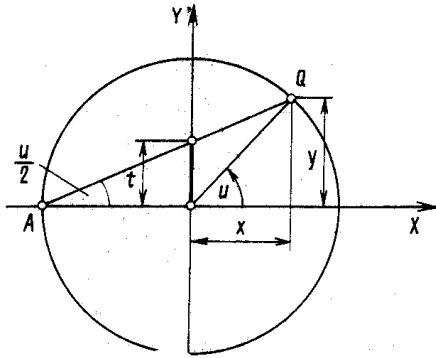


Рисунок 5.16 – Параметрическое задание окружности с центром в начале координат

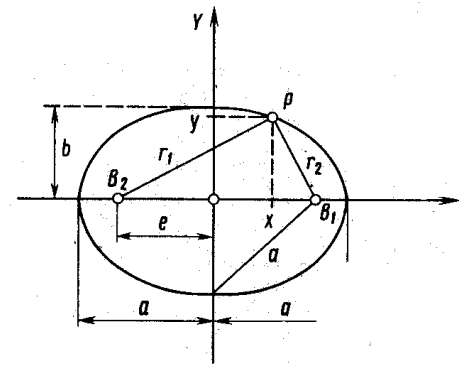


Рисунок 5.17 – Эллипс

Другой недостаток параметрического задания кривой заключается в том, что при исключении параметра рассматривается не вся кривая, а только ее часть, так как в противном случае получаемое решение может быть неоднозначным.

Эллипсом называется геометрическое место точек на плоскости, сумма расстояний от которых до двух заданных точек постоянна (рисунок 5.17).

Из определения эллипса получаем следующие зависимости:

$$r_1 + r_2 = 2a, \quad (5.26)$$

$$e^2 = a^2 - b^2. \quad (5.27)$$

В аналитической геометрии на плоскости каноническое уравнение эллипса имеет вид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (5.28)$$

Параметрическое задание эллипса с использованием трансцендентной тригонометрической функции выглядит следующим образом:

$$x = a \cos t, \quad (5.29)$$

$$y = b \sin t. \quad (5.30)$$

Каноническое уравнение гиперболы:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (5.31)$$

Каноническое уравнение параболы можно записать в следующем виде:

$$y^2 = 2px. \quad (5.32)$$

Многоугольником называется плоская фигура, ограниченная замкнутой ломаной линией. Многоугольник характеризуется количеством вершин. Мно-

гоугольник называется выпуклым, если через каждое его ребро можно провести такую прямую, что все вершины многоугольника, не находящиеся на прямой, окажутся в одной полуплоскости. Выпуклый многоугольник называется правильным, если равны все его стороны и внутренние углы.

Если многоугольник имеет n сторон, то сумма его внутренних углов равна $(n - 2) 180^\circ$. Разбив многоугольник на треугольники, можно вычислить площадь этого многоугольника. Она равна сумме площадей треугольников. Площадь треугольника определяется по формуле

$$F = \frac{1}{2} b h = \frac{1}{2} a b \sin \varphi. \quad (5.33)$$

В аналитической геометрии уравнение $F(x, y, z) = 0$ определяет поверхность [27]. Если $F(x, y, z)$ является линейной функцией относительно переменных x, y, z , то при $A \neq B \neq C \neq 0$ уравнение $Ax + By + Cz - D = 0$ определяет плоскость.

Плоскость можно задать тремя точками, не лежащими на одной прямой, или точкой и двумя произвольными неколлинеарными векторами, приложенными к этой точке. Например, плоскость, проходящая через точки A, B, C , заданные радиус-векторами $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$, определяется уравнением (рисунок 5.18):

$$\mathbf{x} = \mathbf{a} + \lambda(\mathbf{b} - \mathbf{a}) + \mu(\mathbf{c} - \mathbf{a}). \quad (5.34)$$

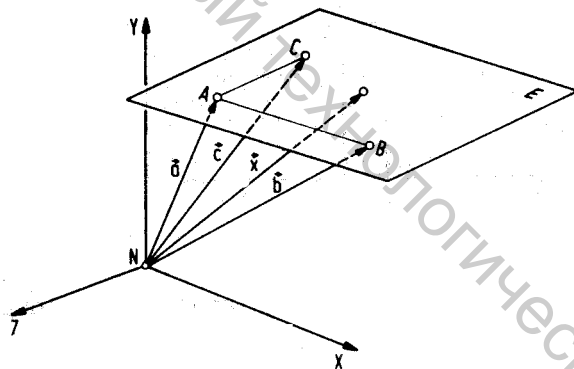


Рисунок 5.18 – Уравнение плоскости, проходящей через три точки

Уравнение плоскости в отрезках имеет вид (рисунок 5.19)

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1. \quad (5.35)$$

Нормальное уравнение плоскости имеет вид (рисунок 5.20):

$$n_1 x + n_2 y + n_3 z - p = 0, \quad (5.36)$$

или в векторной форме:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{x} = p, \quad (5.37)$$

где \vec{n} – нормальный вектор плоскости.

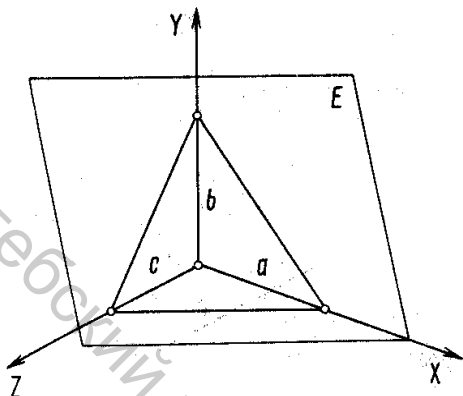


Рисунок 5.19 – Уравнение плоскости в отрезках

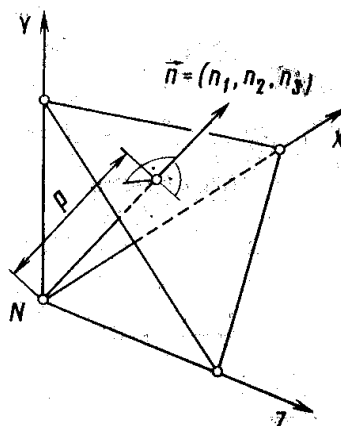


Рисунок 5.20 – Нормальное уравнение плоскости

Поверхность второго порядка определяется алгебраическим уравнением второй степени:

$$F(x, y, z) = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + a_{22}y^2 + 2a_{23}yz + a_{33}z^2 + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (5.38)$$

где $a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{13}^2 + a_{22}^2 + a_{23}^2 + a_{33}^2 \neq 0$.

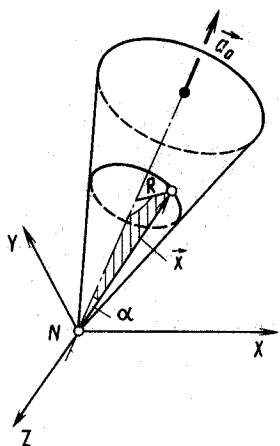


Рисунок 5.21 - Уравнение кругового конуса

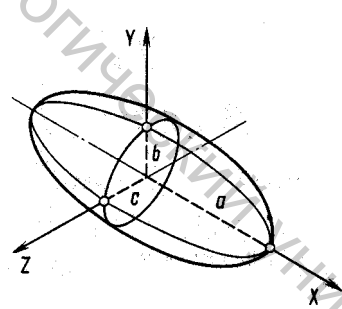


Рисунок 5.22 – Эллипсоид

К поверхностям второго порядка относятся сфера, конус, цилиндр эллипсоид, поверхности вращения, линейчатые поверхности и др.

Сфера есть геометрическое место точек в пространстве, находящихся на одинаковом расстоянии (радиус) от фиксированной точки (центр). Аналитическая сфера задается уравнением:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xx_m - 2yy_m - 2zz_m + x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - R^2 = 0. \quad (5.39)$$

Подставив сюда $x_{ku} = (x, y, z)$; $x_m = (x_m, y_m, z_m)$; $x_{ku}^2 - 2x_{ku} \cdot x_m + x_m^2 - R^2 = 0$, получим уравнение сферы в векторной форме:

$$(x_{ku} - x_m)^2 - R^2 = 0, \quad (5.40)$$

где x_m – радиус-вектор центра сферы.

Круговой конус с вершиной в начале координат определяется уравнением:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0. \quad (5.41)$$

В векторной форме уравнение кругового конуса имеет вид (рисунок 5.21):

$$x \cdot a_0 = |x| \cos \alpha, \quad |a_0| = 1. \quad (5.42)$$

Каноническое уравнение эллипсоида (рисунок 5.22):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (5.43)$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида.

Уравнение цилиндрической поверхности в векторной форме имеет вид:

$$|x|^2 - (x \cdot a_0)^2 = R^2, \quad |a_0| = 1, \quad (5.44)$$

где R – радиус цилиндра;

x – радиус-вектор любой точки на боковой поверхности цилиндра;

a_0 – единичный вектор в направлении оси вращения.

Наряду с поверхностями, которые можно интерпретировать как поверхности вращения, в геометрических расчетах используются линейчатые поверхности. Такие поверхности получаются вследствие перемещения по определенному закону прямой G вдоль пространственной кривой C (директрисы, рисунок 5.23).

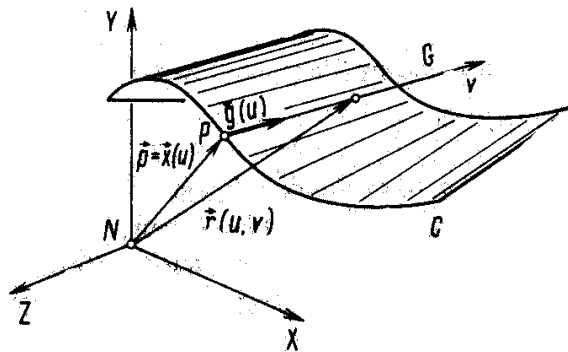


Рисунок 5.23 – Линейчатая поверхность: C – директриса; G – прямая

Пусть пространственная кривая C определяется уравнением

$$x = x(u). \quad (5.45)$$

Прямая G задана точкой на кривой $p = x(u)$ и направляющим вектором, зависящим от параметра – $g(u)$. Тогда линейчатая поверхность, образованная прямой G , описывается уравнением

$$r(u, v) = x(u) + vg(u). \quad (5.46)$$

К линейчатым поверхностям можно отнести конус, цилиндр и плоскость.

Лекция 6. Аналитически не описываемые геометрические объекты

При описании и конструировании внешних геометрических форм проектируемого изделия с использованием ЭВМ различают два подхода. Первый подход основан на методах точного аналитического описания кривых и поверхностей, второй подход использует приближенные методы: метод интерполяции и метод аппроксимации. Интерполяция и аппроксимация проводятся с применением наиболее удобных базисных полиномов. Кривые и поверхности, полученные такими приближенными методами, называются аналитически не описываемыми геометрическими объектами. Такого рода кривые и поверхности преимущественно используются при описании геометрических объектов в самолето-, судо- и машиностроении. Применение таких кривых и поверхностей можно объяснить следующими особенностями.

Кривая и поверхность должны удовлетворять определенным свойствам действительного объекта, например, проходить через заданные точки.

Интерактивное конструирование кривых и поверхностей должно носить итерационный характер. Модель, полученную на некотором шаге итерации, модифицируют и улучшают до тех пор, пока не будет достигнута желаемая форма кривой или поверхности.

Поверхности в большинстве случаев должны быть гладкими, и нерегулярности должны находиться внутри предполагаемых границ. Аналитически эти требования означают, что кривые или поверхности должны быть многократно дифференцируемы и их производные должны удовлетворять критериям непрерывности. В общем случае кривая или поверхность является C^n -непрерывной функцией ($n \geq 1$), если ее n -я производная непрерывна.

Графическое изображение искривленной поверхности, получаемое в результате интерполяции, необходимо использовать как при оценке свойств формы, так и при разработке технологического процесса на данную поверхность.

Форма аналитически не описываемых геометрических объектов обусловлена функциональными или эстетическими требованиями. Так, например, в последнее время в автомобилестроении особое внимание при конструировании кузовов уделяется эстетичности изделия, а в самолето- и энергомашинострое-

нии проектирование контура детали осуществляется с учетом обеспечения ее аэрогидродинамических свойств и прочности.

Одним из основных требований, предъявляемых к методам конструирования такого рода кривых и изогнутых поверхностей, является получение желаемой формы геометрического объекта с использованием минимального количества параметров. Описание геометрического объекта предполагает наличие некоторого множества параметров, часть которых является обязательной, а другие параметры влияют на точность данного описания. Тогда выбор параметров зависит от требуемой точности описания.

При построении кривых следует руководствоваться следующими положениями:

- необходимо использовать характеристическую ломаную, которая в первом приближении передает форму кривой. Вершины этой ломаной могут и не принадлежать кривой (рисунок 6.1).

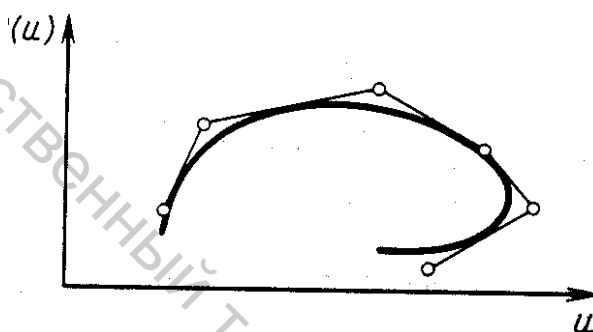


Рисунок 6.1 – Характеристическая ломаная заданной кривой

- увеличение числа сегментов кривой при повышении степени аппроксимирующего полинома не должно нарушать гладкость кривой, так как нежелательные экстремумы приводят к появлению петель, а точки перегиба вызывают осцилляцию кривой, и с ростом степени полинома повышается вероятность появления таких свойств:

- должна быть предусмотрена возможность локальных и глобальных изменений формы кривой (рисунок 6.2);

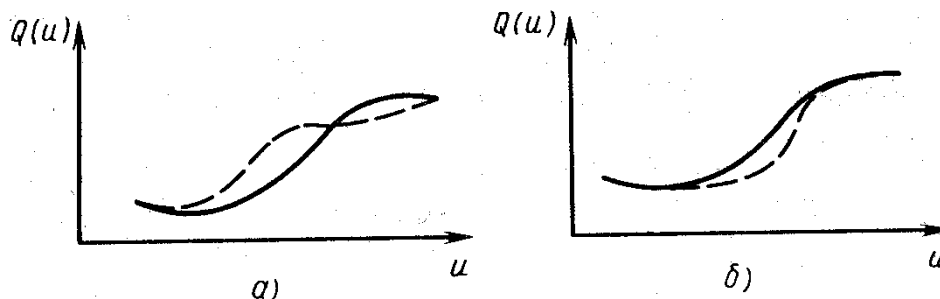


Рисунок 6.2 – Глобальное (а) и локальное (в) изменение формы кривой

- для кривой желательна непрерывность более высокого порядка (рисунок 6.3 – 6.5);

- кривая должна быть сегментируемой. Отдельные сегменты соединяются в соответствии с граничными условиями (рисунок 6.6).

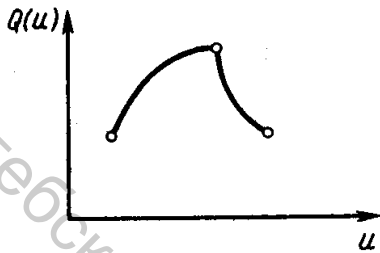


Рисунок 6.3 - Непрерывность нулевого порядка

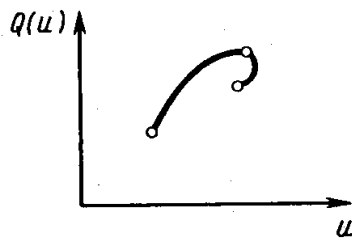


Рисунок 6.4 - Непрерывность первого порядка

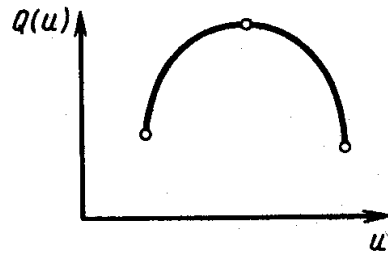


Рисунок 6.5 - Непрерывность второго порядка

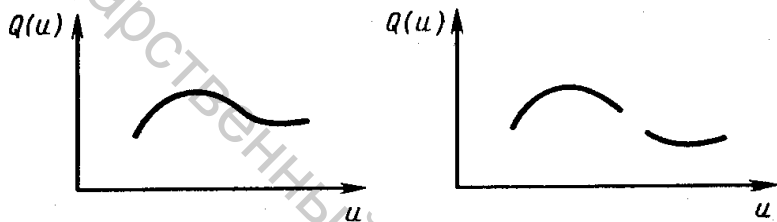


Рисунок 6.6 – Сегментирующая кривая

Процесс конструирования искривленных поверхностей базируется на следующих трех принципах:

- форму проектируемой поверхности может представить только конструктор. Такая форма, как правило, удовлетворяет в большей степени эстетическим требованиям, чем функциональному назначению. Поэтому при построении поверхностей надо использовать метод интерактивного ввода с предоставлением возможности вносить изменения в изображение объекта на экране дисплея;

- получение графического изображения реальной модели. Здесь также следует использовать преимущества интерактивного ввода. Однако при оцифровывании изображения появляются ошибки, вызванные неточностью измерений. Они могут быть устранены путем построения множества изображений, таких, как проекции и сечения;

- конструирование поверхности осуществляется с учетом ее функциональных свойств. Например, при конструировании фюзеляжа самолета необходимо учитывать аэродинамическое сопротивление поверхности.

Как правило, на практике это деление условно. Но общим у этих подходов к конструированию поверхностей является использование минимального количества параметров для описания объектов. Входные данные должны обес-

печивать простейшие расчеты и преобразования. Желательно предоставить конструктору возможность задавать параметры в графическом виде.

Таким образом, к методам конструирования кривых и поверхностей предъявляются следующие требования:

- описание кривых и поверхностей на основе какого-либо метода предполагает использование минимума параметров, которые могут быть легко определены;

- методы должны допускать локальные и глобальные изменения формы кривых и поверхностей;

- возможность изменения параметров, даже если кривая имеет кусочно-гладкий вид. Под гладкой дугой понимается дуга кривой с непрерывно изменяющимися касательными. Под гладкой порцией (*patch*) поверхности понимается порция поверхности с непрерывно изменяющимися касательными плоскостями. Понятие «гладкий» включает также следующие требования:

- кривая или поверхность должны обладать малой осцилляцией;
- возможность определения точек перегиба кривой;
- требование многократной дифференцируемости кривой или поверхности;

- методы должны допускать построение прямых линий или плоских поверхностей, а также расчет точек перегиба в случае кривых и точек пересечения (кривых пересечения) в случае поверхностей;

- методы должны обеспечивать гладкое соединение кривых или поверхностей;

- должны быть возможны преобразование и изображение кривых или поверхностей в пространстве;

- методы должны описывать кривые или поверхности, соответственно касательные или касательные плоскости, которые параллельны осям координат или плоскостям координат;

- независимое определение координат произвольной точки объекта;

- кривые и поверхности должны быть сегментируемыми при сохранении своей исходной формы.

Задача аппроксимации состоит в определении приближенного описания для исходной кривой или поверхности. Такое приближенное описание может быть обработано с использованием различных вычислительных методов. Исходные кривые и поверхности должны удовлетворять ограничениям, накладываемым методами аппроксимации. В дальнейшем будут рассмотрены следующие методы аппроксимации кривых и поверхностей: метод Эрмита, метод Фергюсона, метод Безье, метод аппроксимации с помощью кубических и *B*-сплайн-функций, метод Кунса.

Интерполяция является частным случаем аппроксимации, в котором требуется согласование исходной и аппроксимирующей кривой или поверхности в заданных опорных точках (рисунок 6.7).

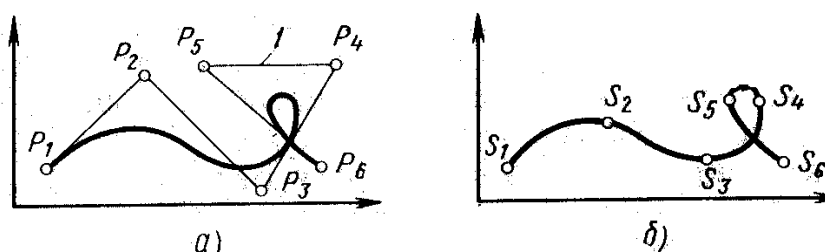


Рисунок 6.7 – Аппроксимация (а) и интерполяция (б) кривой:
1 – характеристическая ломаная

Наиболее известными методами конструирования кривых и поверхностей являются полиномиальная интерполяция Лагранжа и Эрмита. Произвольные непрерывные кривые в пространстве можно аппроксимировать аналитически описываемыми объектами. При этом сегменты пространственных кривых аппроксимируются отрезками, дугой окружности, параболами и кривыми более высокого порядка. Однако применение этих методов приводит к большому объему обрабатываемой информации и требует значительных затрат, связанных с разбиением пространственной кривой на отдельные сегменты.

Самой известной формой аппроксимации плоской кривой является интерполяция с использованием следующего полинома:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x^i .$$

Если заданы координаты $(n+1)$ -й точки кривой, то коэффициенты получаются как решение линейной системы из $(n+1)$ -го уравнения.

Преимущество такой аппроксимации кривой заключается в простом вычислении коэффициентов. Однако это представление имеет ряд существенных недостатков:

- наличие вертикальных касательных делает невозможной аппроксимацию этой формы. Этот недостаток можно устранить, выбрав соответствующим образом систему координат;

- вид аппроксимирующего полинома зависит от выбора системы координат;

- зависимость между коэффициентами полинома a_i и формой кривой не является очевидной, а просматривается только после соответствующих преобразований. Одному значению параметра может соответствовать несколько значений зависимых переменных (рисунок 6.8);

- аппроксимирующий полином зависит от преобразований над объектом.

Указанные выше недостатки характерны также для пространственных кривых и поверхностей. По этим причинам кривую общего вида задают не в явном виде, а используют ее параметрическую форму представления.

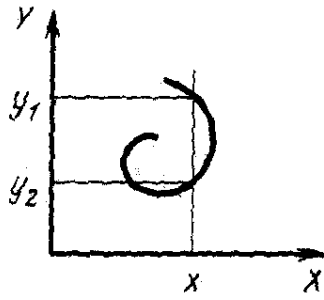


Рисунок 6.8 – Неоднозначность кривой при неявном задании

Кривую в трехмерном пространстве можно рассматривать как линию пересечения двух поверхностей, и, следовательно, ее можно описать системой из двух уравнений. При конструировании поверхности необходимо задать также область изменения параметров.

$$x = x(u),$$

$$y = y(u),$$

$$z = z(u), \quad u \in I, \quad I - \text{интервал.}$$

На рисунке 6.9 приведен пример, поясняющий зависимость между неявным и параметрическим заданием кривой. При этом существенно, что координаты x , y , z определяются с помощью параметра u . Для каждой точки кривой, заданной координатами x , y и z , в зависимости от степени свободы параметра u составляется уравнение, которое соответствует заданию кривой в неявном виде.

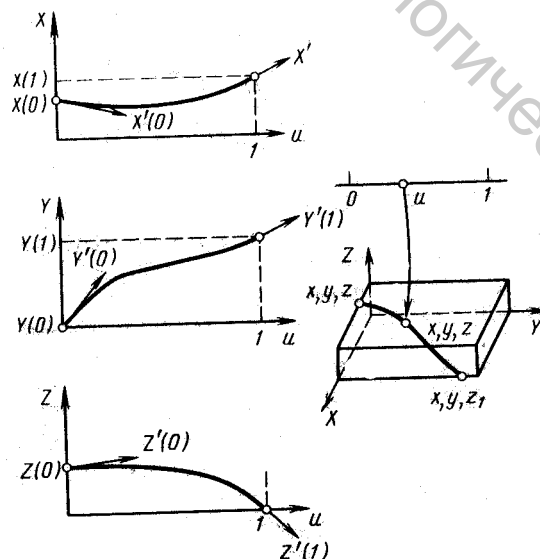


Рисунок 6.9 - Зависимость между видами задания кривой

Использование параметрического представления кривых и поверхностей можно объяснить следующими особенностями. Каждому значению параметров u в случае кривых или каждому значению параметров u и v в случае поверхностей соответствует одно значение зависимых переменных. При этом каждая переменная изменяется независимо от других. Наиболее важным является то, что при параметрическом задании кривой выбор системы координат не оказывает влияния на форму кривой.

Если форма проектируемого объекта определяется не только с помощью точек, а зависит, например, от параметров, заданных в дифференциальной форме, то возрастает объем обрабатываемой информации.

Обычно в качестве аппроксимирующей функции используются полиномы. Но они могут иметь действительные нули, которые приводят к нежелательным осцилляциям. Поэтому следует использовать методы кусочно-линейной аппроксимации полиномами, заданными в параметрической форме. Это означает, что кривую можно аппроксимировать различными методами. В качестве критерия аппроксимации можно выбрать, например, максимальное расстояние между точками кривой или поверхности. Однако это связано с большим объемом вычислений.

Для кусочной аппроксимации необходимы методы, которые обеспечивают гладкое соединение отдельных кривых или сегментов поверхностей, а также позволяют управлять их формой. Включение сегмента кривой не должно нарушать гладкости всей кривой. Эти методы должны обеспечивать возможность управления формой кривой с помощью изменения небольшого числа параметров, в особенности если они могут быть заданы в графическом виде. Если параметры представлены в дифференциальном или интегральном виде, то усложняется контроль за формой кривой. Поэтому на кривой следует выделять такие точки, которые оказывают наибольшее влияние на ее форму.

6.1 Параметрические кривые в форме Фергюсона

На рисунке 6.10 изображена параметрическая кривая в форме Фергюсона. Кривая описывается уравнением вида:

$$P(v) = m v^3 + n v^2 + p v + q,$$

где v – параметр, а m , n , p , q – векторы.

Для определения этих векторов необходимо сделать следующие предположения:

- значение параметра v в начальной точке кривой равно 0, а в конечной точке – 1;
- заданы координаты граничных точек кривой $P(0)$ и $P(1)$, а также производные в этих точках.

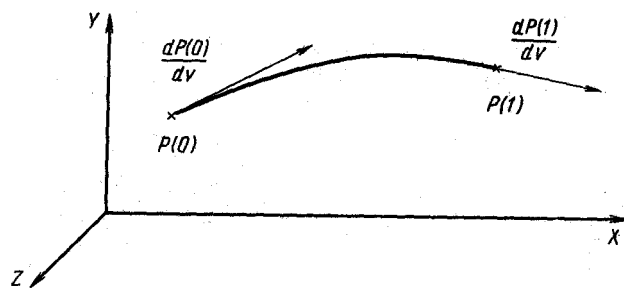


Рисунок 6.10 – Параметрическая кривая в форме Фергюсона

Векторы m , n , p , q находятся из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} A &= P(0) = q; \\ B &= P(1) = m + n + p + q; \\ C &= \left. \frac{dP}{dv} \right|_{v=0} = p; \\ D &= \left. \frac{dP}{dv} \right|_{v=1} = 3m + 2n + p. \end{aligned}$$

Отсюда получаем:

$$\begin{aligned} m &= 2(A - B) + C + D; \\ n &= 3(5 - A) - 2C - D; \\ p &= C; \\ q &= A. \end{aligned}$$

Параметрическая кривая, заданная в форме Фергюсона, имеет следующие свойства:

- кривая полностью определена условиями, заданными в граничных точках;
- касательные к кривой, проведенные в граничных точках, коллинеарны векторам производной по параметру v , поэтому возможно гладкое соединение сегментов кривых, если равны координаты их граничных точек и совпадают направления параметрических производных в этих точках;
- изменение модулей векторов производных влечет за собой изменение всей формы кривой.

6.2 Кривые, построенные с помощью кубических сплайн-функций

Интерполяционным сплайном называется кривая, образующаяся между узлами сетки отрезками параболы и обеспечивающая точное совпадение значе-

ний интерполяционной функции со значениями самой функции в узлах сетки, а в интервалах между узлами – минимальное отклонение от исходной кривой (рисунок 6.11).

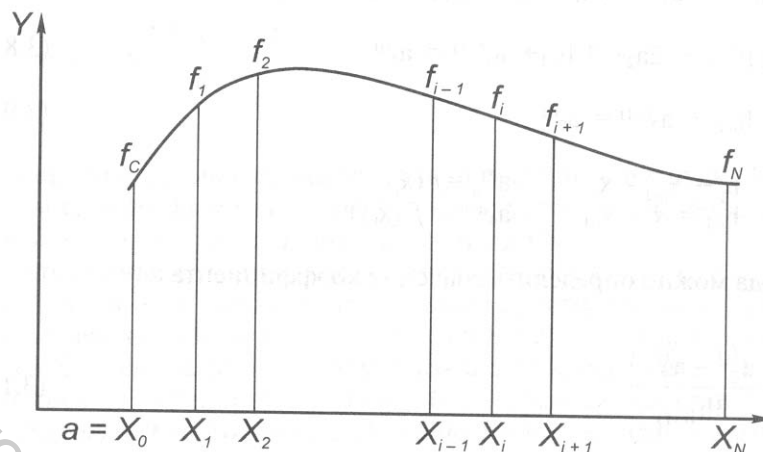


Рисунок 6.11 – Аппроксимация кубическим сплайном

Сплайн-функция обладает следующими свойствами:

1. На каждом участке между узлами сетки $|x_i; x_{i+1}|$ является кубическим полиномом.

2. $S(x)$ непрерывна и имеет непрерывные 1 и 2 производные.

3. Функция $S(x)$ удовлетворяет следующим условиям (краевые условия):

$$S'(x_i) = f'(x_i), \quad (i = 0, N)$$

$$S''(x_i) = f''(x_i), \quad (i = 0, N).$$

4. Функция должна быть однозначна. Пусть имеется набор точек на плоскости x_i, y_i . Необходимо провести гладкую линию, проходящую через эти точки. Математическую модель линии можно создать на основе аналогии с гибким бруском, проходящим через N точек и имеющим коэффициент упругости.

На каждом интервале между двумя точками $[x_i, x_{i+1}]$ кривая интерполируется кубическим полиномом

$$S(x) = a_0(i) + a_1(i)(x - x_i) + a_2(i)(x - x_i)^2 + a_3(i)(x - x_i)^3,$$

при этом $S(x) = f(x); i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Метод интерполяции кривых с использованием кубических сплайн-функций заключается в построении кубического интерполирующего полинома на каждом интервале, причем в общем случае соединение сегментов кривой не является гладким.

Функция, которая составлена из полиномов k -й степени и в узлах является $(k - 1)$ раз непрерывно дифференцируемой, называется сплайн-функцией. Если заданы также опорные точки, через которые проходит кривая, то говорят об интерполирующей сплайн-функции, сокращенно называемой сплайном.

Функция $Q(u)$ называется кубическим сплайном, если:

1) задан упорядоченный набор из $(n + 1)$ -й точки u_0, \dots, u_n (узлы) и соответствующие им опорные точки S_0, \dots, S_n ;

2) на каждом интервале (u_k, u_{k+1}) для $k = 0, 1, \dots, n$ функция $Q(u)$ является кубическим полиномом $f_k(u)$ ($k = 3$):

$$f_k(u) = A_k(u - u_k)^3 + B_k(u - u_k)^2 + C_k(u - u_k) + D_k;$$

3) в узлах u_0, \dots, u_n функция принимает заданные значения S_0, \dots, S_n : $Q(u_k) = S_k, k = 0, \dots, n$;

4) на всем интервале, включая и узлы, $Q(u)$ должна быть дважды непрерывно дифференцируемой функцией, т. е.

$$f_k''(u_{k+1}) = f_{k+1}'(u_{k+1}),$$

$$f_k''(u_{k+1}) = f_{k+1}''(u_{k+1});$$

5) заданы значения первых производных в граничных точках u_0 и u_n или значения первых двух производных в граничной точке u_0 .

Кубические сплайны обладают следующими преимуществами:

- вследствие простого задания кривой удобны в использовании, так как для построения кривой необходимы только значения сплайн-функций в узлах (опорные точки) и значения первых производных в концевых точках;

- на каждом интервале кривая определяется кубическим полиномом;

- так как кривая на всем интервале является дважды непрерывно дифференцируемой функцией, то у кривой нет точек перегиба.

К недостаткам интерполяции кривой с использованием кубических сплайнов следует отнести необходимость задания $(n - 1)$ значений производных.

6.3 Представление кривой по Эрмиту

Для конструирования пространственной кривой с использованием интерполяционных полиномов Эрмита необходима геометрическая информация о концевых точках и задание первых n производных в этих точках.

Кривую можно интерполировать на заданном интервале, если в качестве весовых функций выбрать кубические полиномы следующего вида:

$$x(u) = a_x u^3 + b_x u^2 + c_x u + d_x;$$

$$y(u) = a_y u^3 + b_y u^2 + c_y u + d_y;$$

$$z(u) = a_z u^3 + b_z u^2 + c_z u + d_z.$$

При определении коэффициентов

$$(a_i, b_i, c_i, d_i), i = |x, y, z|$$

с использованием координат концевых точек, а также концевых касательных векторов получаем следующую матрицу Эрмита:

$$M_H = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Если весовые функции и краевые условия записать в матричном виде $x(u) = (u^3 u^2 u 1) (a_x b_x c_x d_x)^T U K_x$

и

$$G_H = \begin{bmatrix} P(0) \\ P(1) \\ P(0) \\ P(1) \end{bmatrix},$$

то получим представление кривой по Эрмиту:

$$Q(u) = \begin{bmatrix} x(u) \\ y(u) \\ z(u) \end{bmatrix} = U M_H G_H, \quad 0 \leq u \leq 1,$$

где

$$U M_H = \begin{bmatrix} 2u^3 - 3u^2 + 1 \\ -2u^3 + 3u^2 \\ u^3 - 2u^2 + u \\ u^3 - u^2 \end{bmatrix}.$$

Желаемую форму кривой можно получить при изменении длины касательных векторов или их направления.

На рисунке 6.12 приведен пример, иллюстрирующий зависимость формы кривой от длины касательных векторов в концевых точках, а на рисунке 6.13 – от их направления. Эти примеры показывают, что сегменты кривых соединяют гладко, если в концевых точках этих сегментов заданы одинаковые касательные векторы.

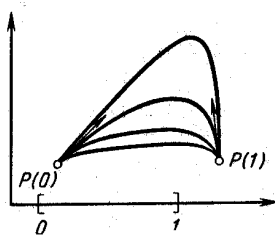


Рисунок 6.12 – Зависимость формы кривой от длины векторов

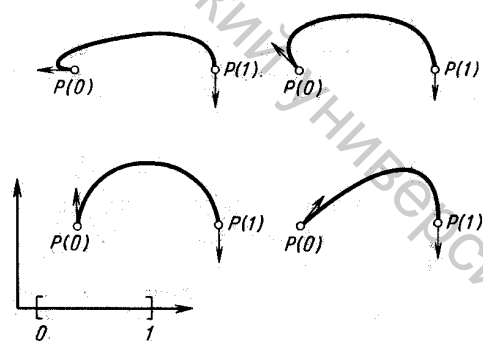


Рисунок 6.13 – Зависимость формы кривой от направления векторов

Кусочная интерполяция пространственной кривой по Эрмиту позволяет построить гладкую кривую, но для получения желаемой формы кривой необхо-

можно относительно плотно установить опорные точки, т. е. концевые точки сегментов. Это приводит к возрастанию объема обрабатываемой информации. Таким образом, изменение опорных точек кривой приводит к изменению всей формы кривой. Поэтому интерполяция кривой по Эрмиту не допускает локальных изменений кривой.

6.4 Определение кривой по Безье

Представление кривой в форме Безье имеет вид (рисунке 6.14):

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n S_i g_{i,n}(v), \quad 0 \leq v \leq 1,$$

где в качестве базисных функций используются полиномы Бернштейна степени n :

$$g_{i,n} = \binom{n}{i} v^i (1-v)^{n-1}, \quad i = 0, \dots, n.$$

Такая кривая аппроксимирует ломаную, вершинами которой являются опорные точки S_0, S_1, \dots, S_n . Эту ломаную называют характеристической ломаной заданной кривой. Преимущество метода Безье заключается в том, что в силу своего построения кривая является гладкой. Как и в приведенных выше методах, под гладкостью понимается дифференцируемость.

Граничные точки кривой Безье совпадают с крайними вершинами характеристической ломаной, причем первое и последнее звенья ломаной являются касательными к кривой соответственно в начальной и конечной точках. Форма кривой Безье зависит от расположения вершин характеристической ломаной, причем передвижение вершин вызывает изменение всей формы кривой.

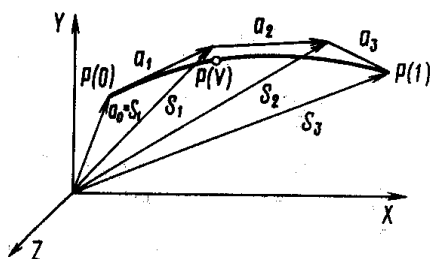


Рисунок 6.14 – Аппроксимация кривой по Безье

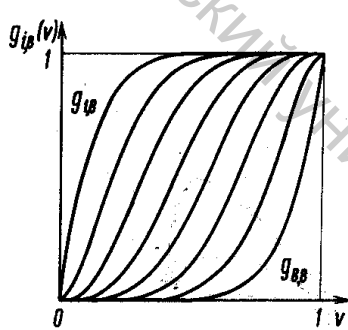


Рисунок 6.15 – Многочлен Бернштейна ($i=1, \dots, 8$) на интервале $[0, 1]$

При повышении степени многочленов Бернштейна, достигаемом увеличением числа звеньев ломаной, например, вследствие деления их пополам, уменьшается отклонение характеристической ломаной от кривой

Безье, т. е. с ростом n последовательность звеньев ломаной сходится к кривой Безье.

На рисунке 6.15 представлены многочлены Бернштейна для $n = 8$.

Достаточным условием гладкого соединения двух кривых Безье является коллинеарность трех последовательных вершин характеристической ломаной S_{i-1} , S_i и S_{i+1} . При этом конечная точка P_i одной кривой одновременно является и начальной точкой другой кривой.

Аппроксимация методом Безье может быть применена для решения задач построения кривой, если главную роль играют такие критерии, как внешний вид, гладкость кривой, отсутствие осцилляции, и не стоит задача проведения кривой через заданные точки.

Кривая Безье однозначно задается ломаной линией Безье (рисунок 6.16) и описывается уравнением вида

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i J_{nj}(t), t \in [0,1],$$

где $P(t)$ – радиус-вектор на кривой;

P_i – вершины аппроксимируемой ломаной Безье;

$J_{nj}(t)$ – весовая функция.

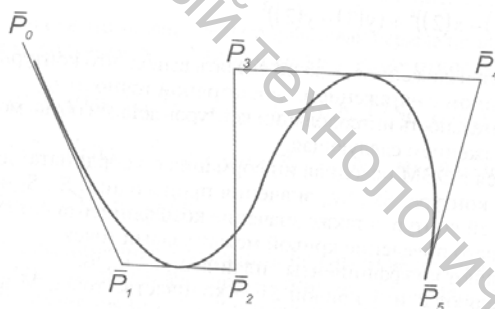


Рисунок 6.16 – Задание кривой ломаной Безье

Меняя вершины ломаной, можно управлять формой кривой. При этом необходимо учитывать следующие свойства ломаной линии Безье:

1. Кривой принадлежат только первая и последняя n -я вершины ломаной Безье, остальные вершины влияют на порядок и вид кривой.

2. Степень аппроксимирующего полинома равна n , то есть числу звеньев ломаной Безье.

Аппроксимация кривых методом Безье является удобной для работы в интерактивном режиме. Например, если необходимо получить на экране графического дисплея изображение линий, отображающих эскиз модели обуви, удобно вместо ввода большого количества точек и аппроксимации кубическим сплайном подобрать несколько вариантов ломаной Безье и получить математи-

ческую модель эскиза. Этот способ более экономичный с позиции использования памяти ЭВМ, но при этом необходимо учитывать следующее:

- на расположение кривой Безье оказывают влияние координаты всех узлов ломаной; при изменении координат одной точки меняется вся кривая.
- только изменение числа вершин ломаной ведет к изменению порядка кривой.

К недостаткам параметрического представления кривой Безье следует отнести то, что степень кривой растет пропорционально числу звеньев характеристической ломаной. Кроме того, изменение вершин ломаной влияет на всю форму кривой. Поэтому аппроксимацию кривой по Безье относят к глобальным методам.

6.5 Кривые, построенные с помощью B-сплайнов

Ранее под сплайном понимали гибкие деревянные или металлические линейки, которые называли также лекалами. Они могли изгибаться так, чтобы проходить через заданные точки. Кривые, описанные таким сплайном, находят широкое применение в судостроении, автомобилестроении и самолетостроении. В настоящее время имеются удобные математические методы для описания таких кривых, поэтому они используются при конструировании криволинейных форм и в других отраслях промышленности.

Пусть $U = (u_0 = 0, u_1, \dots, u_n = n)$, $u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_n$ – разбиение интервала $[0, n]$ на отрезки (u_i, u_{i+1}) , где n и $u_i = i$, $i = 0, \dots, n$ являются натуральными числами. При этом u_i называются узлами, а U – множеством узлов.

B -сплайном k -го порядка называется функция $M_{i,k}(x)$, равная нулю на данном множестве узлов, за исключением k последовательных отрезков.

Шерберг показал, что метод аппроксимации с помощью B -сплайнов позволяет получить кривые, которые имеют такие же свойства, как и кривые Безье. Это означает:

- оптимальную аппроксимацию линейных функций;
- число точек пересечения кривой с прямой $y = ax + b$ не превосходит числа точек пересечения этой же прямой с характеристической ломаной.

Аппроксимация кривой с помощью B -сплайнов позволяет спланировать недостатки метода Безье, в котором форма и степень кривой зависят от количества опорных точек. Эти недостатки можно полностью устранить, если при конструировании кривых использовать модифицированные нормализованные B -сплайн-функции.

Нормализованная B -сплайн-функция определяется выражением

$$N_{i,k}(u) = \frac{u-i}{k-1} N_{i,k-1}(u) + \frac{i+k-u}{k-1} N_{i+1,k-1}(u),$$

и обладает следующими свойствами:

- $\sum_{i=0}^k N_{i,k}(u) = 1$ (выпуклая оболочка);

- на каждом отрезке $N_{i,k}(u)$ является многочленом степени $(k - 1)$;

- на интервале $(0, n)$ $N_{i,k}(u)$ является $(k-2)$ раза непрерывно дифференцируемой функцией;

$N_{i,k}(u) = 0$ для $u < i$;

$N_{i,k}(u) = 0$ для $u \geq i + k$.

На рисунке 6.17 представлены B-сплайн-функции для $k = 1, 2, 3, 4$.

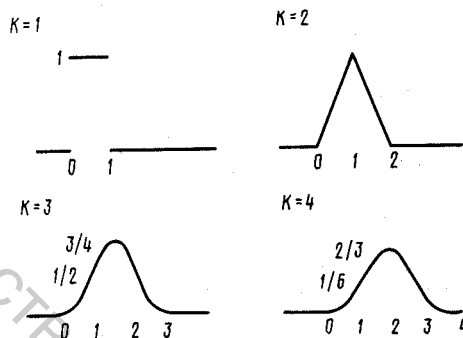


Рисунок 6.17 - B – сплайн с равномерными распределениями узлов для $U = 1.2.3.4$

B-сплайны могут быть периодическими и непериодическими. Для непериодических B-сплайн-функций множество узлов задается следующим образом:

$U = (u_0, \dots, u_n)$, где $u_i \neq u_j$.

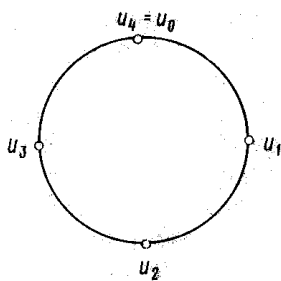


Рисунок 6.18 – Периодический B-сплайн на множестве узлов $U = (u_0, u_1, u_2, u_3, u_4 = u_0)$

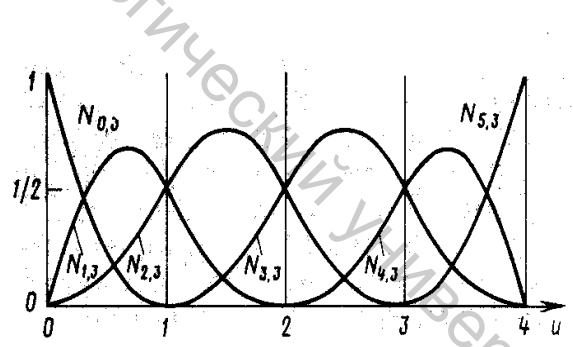


Рисунок 6.19 – Непериодические B-сплайны на множестве узлов $U = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_3, u_7 = u_8)$ для $k = 3$

На рисунке 6.18 приведен пример замкнутого множества узлов, в котором узлы расположены на равном расстоянии друг от друга.

B-сплайны с кратными узлами являются непериодическими функциями

(рисунок 6.19). Как видно из рисунка 6.19, B -сплайн-функция N_{03} состоит из сегмента с кратными узлами u_0, u_1, u_3 .

B -сплайн-функция третьего порядка, записанная в матричной форме, имеет вид:

$$N_{1,3} = \frac{1}{2}(u^2 u_1) \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -2 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если заданы вершины характеристической ломаной P_i и нормализованные периодические B -сплайн-функции k -го порядка $N_{i,k}$, то кривую можно определить с помощью линейной комбинации нормализованных периодических B -сплайнов в следующем виде:

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u).$$

Учитывая соответствие точек ломаной P_i и кривой Q_i , получаем свойство периодичности кривой:

$$Q(u_i) = \sum_{i=0}^n P_i N_{(i-k/2) \bmod n+1, k}(u),$$

или в матричном виде

$$Q = N^T P.$$

Любая кривая состоит из $(m - k + 1)$ сегментов, каждый из которых можно определить с помощью k последовательных опорных точек. Сегмент i -й определяется опорными точками с i по $i + k - 1$. Одна опорная точка может использоваться при определении сегментов не более k раз. Следовательно, если кривую порядка k представить в виде линейной комбинации B -сплайнов, то изменение коэффициента у одного из B -сплайнов влечет за собой изменения только на k сегментах кривой, т. е. аппроксимация B -сплайнами обеспечивает локальную модификацию кривой.

Каждый сегмент кривой Q_l находится внутри выпуклой оболочки, которая определяется множеством опорных точек с P_l по P_{l+k-1} .

В первом приближении характеристическая ломаная передает форму кривой. По виду ломаной можно сделать выводы о свойствах кривой. Кривая имеет максимум столько экстремумов и точек перегиба, сколько соответствующая ей ломаная, а также содержит петли, если они есть у ломаной. Если k последовательных вершин ломаной коллинеарны, то соответствующий сегмент кривой, построенный с помощью B -сплайнов, совпадает с одним из звеньев ломаной. Это означает, что кривая может содержать прямолинейные сегменты. Если у кривой имеется $(k - 1)$ коллинеарных опорных точек, то соответствующее звено ломаной является касательной к кривой.

Введение кратного узла уменьшает порядок гладкости сплайна в этом узле. Если у кривой имеется узел кратности $(k - 1)$, то совпадают $(k - 2)$ звена ха-

рактической ломаной и они являются касательной к кривой. Поэтому у сплайна первая производная имеет разрыв в $(k - 1)$ -кратном узле. Однако параметрические производные являются непрерывными до порядка $(k - 2)$ в этом узле.

Обобщив сказанное выше, получим следующие свойства кривой, построенной с помощью B -сплайнов:

- кривая определяется линейной комбинацией сплайн-функций, коэффициентами которой являются координаты опорных точек $P_i = (P_x, P_y, P_z)$;
- кривая является кусочно-полиномиальной;
- локальное изменение опорных точек не приводит к модификации всей формы кривой;
- кривая находится внутри выпуклой оболочки;
- кривая может содержать прямолинейные отрезки;
- возможно задание координат вершин характеристической ломаной;
- возможно распознавание нежелательных экстремумов и петель кривой по виду характеристической ломаной.

6.6 Интерполяция кривых методом B -сплайнов

Задачей интерполяции кривых методом Безье и методом B -сплайнов является нахождение характеристической ломаной, которая однозначно определяет заданную кривую, причем должны выполняться все интерполяционные ограничения.

В случае построения кривых методом B -сплайнов необходимо иметь зависимость между опорными точками кривой S_i и точками характеристической ломаной P_i и узлами u_i . Через $p_i := u$ обозначим значение параметра из интервала (u_0, u_n) , которое оказывает максимальное влияние на форму кривой, а через S_i – соответствующую точку кривой. Тогда имеет место зависимость.

$$S_i = Q(p_i).$$

Если известны значения параметров p_i , то для опорных точек кривой S_i можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ \vdots \\ S_i \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(p_0) \\ \vdots \\ Q(p_i) \\ \vdots \\ Q(p_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^T(p_0) \\ \vdots \\ u^T(p_i) \\ \vdots \\ u^T(p_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}.$$

В матричной форме эту систему можно переписать следующим образом:

$$(S_i) = (Q(p_i)) = (U^T(p_i))P_i$$

или

$$S = U^T P.$$

Отсюда можно получить решение этой системы в виде:

$$P = (U^T)^{-1} S,$$

т. е. найдена искомая зависимость:

$$P_i = \sum_{i=0}^N S_i N_{(i-k/2) \bmod (n+1), k}^{-1}(p).$$

Для интерполяции кривой методом *B*-сплайнов надо установить соответствие между точками кривой P_i и значениями параметров p_i , от которых зависит форма кривой. Эти значения параметров определяют «качество» интерполяционной кривой. О «качестве» интерполяционной кривой можно судить, например, по отклонению от аналитически заданной кривой, наличию осцилляций или появлению петель.

6.7 Конструирование поверхности по Фергюсону

Для решения задач, связанных с приближением функций и описанием поверхностей, широко применяются параметрические сплайны (например, математический аппарат Фергюссона), среди которых в технических приложениях наибольшее распространение получили сплайны нечетных степеней. Частным случаем параметрического сплайна является сплайн с векторными коэффициентами бикубической степени. Элемент разбиения с вершинами в точках $P(0,0)$, $P(1,0)$, $P(0,1)$ и $P(1,1)$ задается изопараметрическими кривыми $P(u,0)$, $P(u,1)$, $P(0,v)$ и $P(1,v)$, соединяющими эти вершины (рисунок 6.20). Кривая в форме Фергюссона определяется координатами концевых точек и значениями производных в них. Если такие четыре кривые замкнуть, то полученный контур можно рассматривать как границу отсека (участка). Параметры выбираются в соответствии с рисунком 6.20.

Внутренняя часть поверхности также определяется с помощью кривых в форме Фергюссона, которые в зависимости от параметров u и v соединяют две противоположные границы отсека. Так как границы отсека уже сами задают концевые точки переменной кривой, то для их определения не требуется задания параметрических производных. Кривые AD и BC определяют концевые точки кривой RT , которая изменяется в v -направлении. Параметрические производные переменной кривой для параметра $v = 0$ и $v = 1$ должна быть идентичны параметрическим производным границ отсека $\partial A/\partial u$, $\partial B/\partial u$, $\partial C/\partial u$, $\partial D/\partial u$. Чтобы определить производные для других значений параметра v , в точках E , F , G и H фиксируют произвольные векторы $\partial E/\partial v$, $\partial F/\partial v$, $\partial G/\partial v$ и

$\partial H/\partial v$.

Этим определены кривые EH и FG , а следовательно, и параметрические производные:

$$\frac{\partial R}{\partial u} = S(v) - R(v) \text{ и } \frac{\partial T}{\partial u} = U(v) - T(v).$$

Кривые, изменяющиеся в зависимости от параметра u , получаются аналогично, если в точке I определить вектор $\partial I/\partial u$ и проделать аналогичные действия для остальных вершин. Но теперь векторы выбираются не произвольным образом, а в зависимости от уже выбранных векторов, например:

$$\frac{\partial I}{\partial u} = \frac{\partial A}{\partial u} + \frac{\partial E}{\partial v} - \frac{\partial A}{\partial v}.$$

Каждая кривая одного семейства пересекается со всеми кривыми другого семейства.

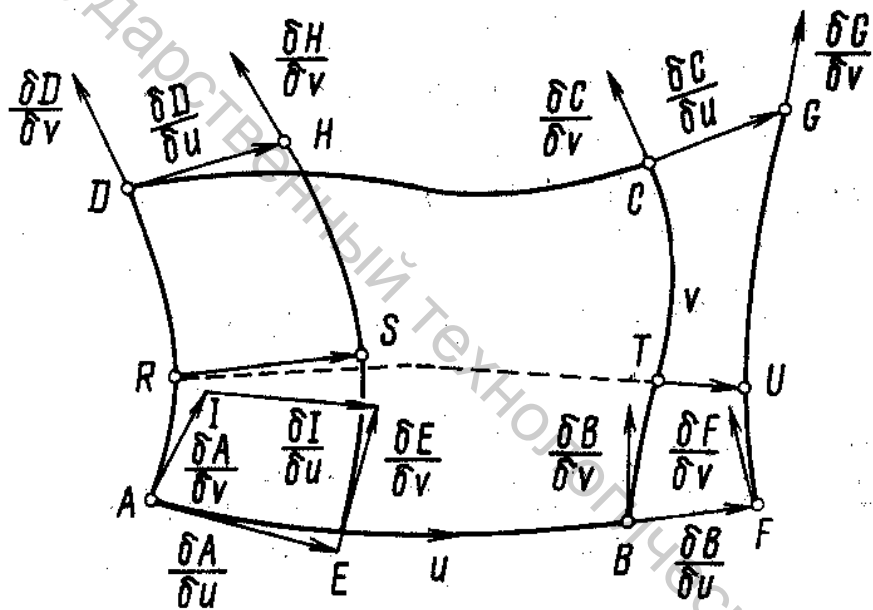


Рисунок 6.20 – Параметрически заданный участок поверхности

Участок поверхности по Фергюссону задается формулой:

$$r(t, s) = r(u, v) = UMBM^T V = [Iuu^2u^3]^* \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & r_v(0,0) & r_v(0,1) \\ r(1,0) & r(1,1) & r_v(1,0) & r_v(1,1) \\ r_u(0,0) & r_u(0,1) & r_{uv}(0,0) & r_{uv}(0,1) \\ r_u(1,0) & r_u(1,1) & r_{uv}(1,0) & r_{uv}(1,1) \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ v^3 \end{bmatrix}$$

где r_u, r_v - касательные векторы, выставленные в узловых точках участка к граничным u - и v -кривым;
 r_{uv} - векторы "закрутки".

При этом удобно перейти от параметров t и s к параметрам U и V , используя формулы:

$$U = \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}; \quad V = \frac{s - s_i}{s_{i+1} - s_i}.$$

Функции при этом определяются при подстановке в них значений параметров U и V .

Векторы закрутки, кратные перекрестной производной функции, обеспечивают гладкость поверхности в месте схождения четырех углов.

Математический аппарат, предложенный Фергюссоном, осуществляет построение интерполяционной поверхности через узловые точки, обеспечивает требуемый порядок гладкости, легко реализуется на практике. Задание поверхности касательными векторами увязывается со способом получения эквидистантных кривых, что может быть использовано для определения траектории движения фрезы при обработке поверхности на станках с ЧПУ.

6.8 Конструирование поверхностей методом Кунса

Поверхность в трехмерном пространстве определяется множеством точек, которые имеют две степени свободы. Если u и w – два независимых параметра, то поверхность, построенную по методу Кунса, можно определить следующим образом:

$$(x, y, z) = (X(u, w), Y(u, w), Z(u, w)) = : uw.$$

Отсюда получаем следующие сокращения:

$$uw_u = \partial(uw) / \partial u, \quad uw_w = \partial(uw) / \partial w,$$

$$uw_{uw} = \partial^2(uw) / (\partial u \partial w).$$

Независимые переменные u и w изменяются внутри интервала $0 \leq u \leq 1$ и $0 \leq w \leq 1$. Отсюда получаются границы отсека поверхности:

$$P(u, w) = uw;$$

$$P(u, 0) = u0;$$

$$P(u, 1) = u1;$$

$$P(0, w) = 0w;$$

$$P(1, w) = 1w.$$

Зафиксировав два параметра, можно определить точку на поверхности.

Таким образом определяются концевые точки границы отсека 00, 01, 10 и 11 (рисунок 6.21). Для дальнейшего рассмотрения Кунс ввел скалярные функции смещения F_0, F_1, G_0 и G_1 , которые являются функцией одного переменного.

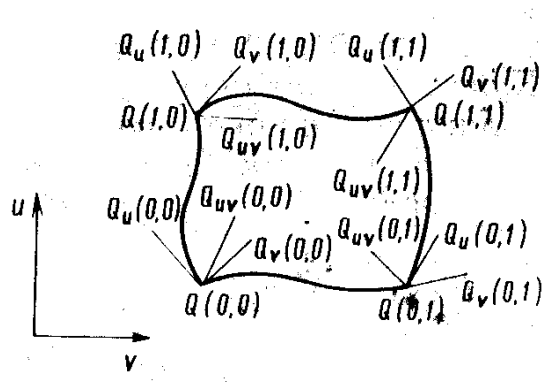


Рисунок 6.21 - Построение поверхности методом Кунса

Для полинома третьей степени, записанного в параметрическом виде,

$$P(u) = \sum_{j=1}^3 a_j u^j = P_1 F_0(u) + P_2 F_1(u) + P_{1u} G_0(u) + P_{2u} G_1(u),$$

получаются следующие функции смещения:

$$\begin{aligned} F_0(u) &= F_{0u} = 2u^3 - 3u^2 + 1; \\ F_1(u) &= F_{1u} = -2u^3 + 3u^2; \\ G_0(u) &= G_{0u} = u^3 - 2u^2 + u; \\ G_1(u) &= G_{1u} = u^3 - u^2. \end{aligned}$$

Отсюда уравнение для бикубической порции поверхности имеет вид:

$$Q(u, w) = (F_{0u} F_{1u} G_{0u} G_{1u}) (P) \begin{bmatrix} F_{0w} \\ F_{1w} \\ G_{0w} \\ G_{1w} \end{bmatrix},$$

либо

$$Q(u, w) = (u^3 u^2 u 1) N P N^T (w^3 w^2 w 1)^T,$$

либо

$$Q(u, w) = U M P N^T W^T.$$

Матрица P содержит значения векторов, характеризующих положение границ поверхности, и значения векторов производных в углах участков поверхности.

Однако не все поверхности можно описать с помощью границ отсека полиномами третьей степени. Можно встретить поверхности, границы отсека ко-

торых определяются только рациональными функциями смещения. Если границы отсека поверхности описываются уравнениями различных типов, то необходимо ввести переменные функции смещения, не зависящие от границ отсека. Также можно использовать функции смещения более высокого порядка, но это приводит к значительным осцилляциям и большому количеству экстремумов.

Для представления граничных кривых и функций смещения Кунс применил *B*-сплайны. Тем самым он объединил преимущества обоих методов.

6.9 Конструирование поверхности методом Безье

Поверхность, построенная по методу Безье, определяется множеством точек, которые образуют характеристическую сетку (рисунок 6.22).

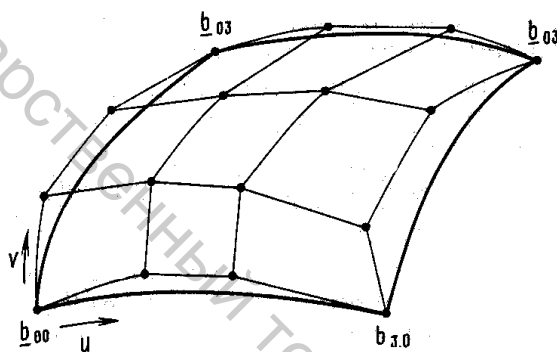


Рисунок 6.22 – Бикубическая поверхность Безье с характеристической сеткой

Такие точки поверхности называются вспомогательными. Если приписать двойной индекс, то их можно рассматривать как элементы матрицы. В этом случае задача конструирования поверхности сводится к определению поверхности по заданной характеристической сетке. Пусть задана матрица A размером $(m + 1) \times (n + 1)$, элементы которой определяют характеристическую сетку поверхности. Из матрицы A выбираются все элементы с одинаковым первым индексом, т. е. все элементы одной строки. Через вспомогательные точки поверхности, которые соответствуют таким элементам, проводится характеристическая ломаная для каждой строки матрицы. В результате этого образуется $(m + 1)$ характеристических ломаных и соответственно определены $(m + 1)$ кривая Безье. На каждой кривой находится точка, которая соответствует определенному значению параметра u . Через полученные $(m + 1)$ точки проводится новая характеристическая ломаная, определяющая кривую Безье с постоянным значением параметра u . Для любого заданного значения параметра v на этой кривой находится искомая точка поверхности $P(u, v)$.

В общем случае уравнение поверхности, построенной по методу Безье, можно записать в виде:

$$P(u, v) = VFAF^T U^T.$$

При этом

$f_{i, n}(v) = VF$ (матрица весовой функции в направлении v),

$f_{j, m}(u) = F^T U^T$ (транспонированная матрица весовой функции в направлении u),

$$\begin{bmatrix} b_{00} & b_{10} & \cdots & b_{m0} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_{0n} & b_{1n} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} = A \text{ (коэффициенты вспомогательных точек поверхности)}$$

Как и в случае интерполяции кривых, так и при интерполяции поверхностей методом Безье находятся вспомогательные точки поверхности, т.е. определяется сетка, которая содержит вершины характеристических ломаных. Из уравнения, определяющего поверхность Безье $P(u, v)$ по заданным точкам поверхности, находится матрица A :

$$A = V^{-1} F^{-1} P(F^T)^{-1} (V^T)^{-1}.$$

6.10 Конструирование поверхности методом В-сплайнов

Определение поверхности методом B -сплайнов аналогично определению поверхности по Безье для случая, когда степень B -сплайн-функций соответствует числу опорных точек. С использованием B -сплайн-кривых k -го порядка в направлении u и B -сплайн-кривых l -го порядка в направлении v можно определить поверхность, полученную методом B -сплайнов, в следующем виде:

$$Q(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) P_{ij} N_{j,l}(v).$$

Порядки B -сплайн-функций k и l могут быть различными.

Наиболее удобен метод аппроксимации поверхности кубическими сплайнами. Поверхность разделяется на отдельные порции

$$Q_{bc}(u, v) = \sum_{i=b-1}^{b+k-2} \sum_{j=c-1}^{c+l-2} N_{i,k}(u) P_{ij} N_{j,l}(v),$$

где $1 \leq b \leq n - k + 2$, $b - 1 \leq u \leq b$,

$1 \leq c \leq m - k + 2$, $c - 1 \leq v \leq c$.

Имеются три различных вида поверхностей:

- поверхности, открытые в направлениях u и v (параметры u и v не достигли своих границ),
- поверхности, замкнутые в направлениях u и v (параметры u и v достигли

своих границ),

- поверхности, замкнутые в одном направлении параметра (один из параметров достиг своей границы, а другой – нет).

Для поверхностей, открытых в направлениях u и v , количество порций определяется по формуле

$$BC = (n - k + 2) (m - k + 2).$$

Для поверхностей, замкнутых по двум направлениям параметров, количество порций определяется следующим образом:

$$BC1 = (n + 1) (m + 1).$$

Поверхность, построенная с использованием периодических B -сплайн-функций, задается уравнением

$$Q(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{(i-k/2) \bmod (n+1), k}(u) \times P_{ij} N_{(j-l/2) \bmod (m+1), l}(v).$$

Лекция 7. Автоматизированное проектирование обуви

7.1 Выбор оптимального метода проектирования обуви

Продукция, выпускаемая современной обувной промышленностью, характеризуется большим модельным разнообразием. Для успеха на рынке предприятие, выпускающее такую продукцию, должно обеспечить быструю сменяемость моделей. Ручной метод проектирования, являясь привычным для модельера, не обеспечивает достаточной скорости подготовки нового изделия. Поэтому встает задача автоматизации процесса проектирования обуви. Рассмотрим основные подходы к проведению такой автоматизации.

1. Самым очевидным является использование уже готовых решений, предоставляемых универсальными САПР. Современные САПР обладают огромным числом функциональных возможностей, и с их помощью может быть решена практически любая задача.

При этом надо учитывать, что для получения максимальной прибыли фирмам-разработчикам универсальных САПР необходимо обеспечить как можно большее количество продаваемых копий конечного программного продукта. А это, в свою очередь, накладывает серьезные ограничения на его функциональные возможности, выделяя и развивая только те функции, которые позволяют охватить как можно большее число потенциальных пользователей. В результате такого компромисса между функциональными возможностями и ценой пользователь получает некоторые коробочные решения, перекрывающие только часть его потребностей. Для решения всего комплекса задач пользователь вынужден искать дополнительные пакеты программ и увязывать их между

собой в единую систему или финансировать программные разработки для решения специализированных задач. Кроме того, очень трудно и дорого найти компетентного профессионала, который смог бы эффективно использовать универсальные САПР.

2. Создание пользовательских приложений на базе уже готовых решений с использованием технологии OLE. При этом универсальная САПР, например, выступает в роли приложения-сервера, а пользовательское приложение – в роли приложения-клиента. Пользователь проводит первичное проектирование с помощью клиента, используя удобную среду с понятной ему терминологией. Также клиент обеспечивает привычный порядок работы, используемый модельером при ручном проектировании. Примером данного подхода служит описанная в статье [1] программа для моделирования и развертки сложных поверхностей, использующая в качестве клиента AutoCAD.

Особенностью данного подхода является то, что необходимо проводить техническую поддержку как сервера, так и клиента. Кроме того, придется затрачивать средства не только на клиента, но и на сервер (который будет стоить значительно дороже клиента).

3. Создание встраиваемых модулей (plug-in) для существующих систем. Например, ряд дизайнерских задач может быть решен в пакете 3D Studio MAX. Для обеспечения решения специфической части задачи пишется встраиваемый модуль.

4. Использование собственных разработок. Создание программных комплексов с привлечением визуальных средств программирования сопряжено с высокими трудовыми, финансовыми и временными затратами. В то же время перспективы создания специализированной системы весьма привлекательны. Прежде всего это максимальное соответствие функциональности системы потребностям пользователя, а также возможность ее дальнейшего эффективного развития. Даже незначительное увеличение производительности за счет применения специализированных систем может принести существенно большую прибыль по сравнению с затратами на их разработку и внедрение.

5. Применение «компонентного программного обеспечения». Как уже отмечалось, специализированные системы могут оказать существенную помощь пользователю, например модельеру, в создании новых изделий. При этом необходимо сокращение ресурсов, требуемых для разработки специализированной САПР. Одним из путей такого сокращения является использование специализированных интерактивных средств быстрой разработки приложений, включающих в себя визуальные средства разработки интерфейсов и баз данных, набор библиотек высокого уровня для работы с 2D и 3D графикой для обеспечения инженерных расчетов и т. п. Подобным инструментальным средством является CAS.CADE французской компании MATRA Datavision.

CAS.CADE – это полностью объективно-ориентированная среда. Современному обувному предприятию для удержания позиций на рынке и выпуска конкурентоспособной продукции, необходимо быстро изменять модельный ряд

выпускаемой продукции. Ручной метод проектирования, являясь привычным для модельера, не обеспечивает достаточной скорости подготовки нового изделия.

В современных условиях требования к внешнему виду изделий обувной промышленности стали более жесткими, а успех изделия на рынке чаще определяется его дизайном, нежели чисто функциональными возможностями. Исходя из этого, для удержания позиций на рынке и выпуска конкурентоспособной продукции обувным предприятиям необходимо быстро изменять модельный ряд выпускаемой продукции. Основная часть работы по созданию новых моделей ложится на модельеров и дизайнеров. Ручной метод проектирования, являясь привычным для модельера, не обеспечивает достаточной скорости подготовки нового изделия. На предприятиях, очень часто, автоматизация труда модельера носит фрагментарный характер. ЭВМ используется в качестве дорогого и усовершенствованного кульмана либо удобного инструмента для рисования. Поэтому зачастую встает задача автоматизации процесса проектирования. Имеется в виду не проектирование как ввод информации об изделии в компьютер с уже готового чертежа, а как творческий процесс создания нового изделия. Работа пользователя с системой также может быть затруднена, если интерфейс системы не учитывает привычный для пользователя порядок проектирования, который он применяет при проектировании изделия вручную. Система должна быть как можно более простой в использовании и не должна сковывать творческой инициативы модельера. В идеале пользователь должен получать решение части задачи, возложенной на компьютер, нажатием одной кнопки (например, построение стандартного сечения проектируемой поверхности). Опыт разработки САПР для проектирования обуви показал, что наиболее перспективным является каркасное проектирование поверхности колодки.

Существующие САПР, в которых есть возможность проектирования плоских кривых и поверхностей, дают не так уж много возможностей модельеру обуви. Вследствие того, что в подобных системах, как правило, реализован стандартный подход к проектированию кривой, состоящей в подборе координат точек кривой и касательных в этих точках. Например, при необходимости провести изменения линии следа, при изменении модели колодки модельеру придется работать с целой группой точек на кривой. При этом весьма сложно представить, каким образом надо переместить эти точки для достижения результата. Данная задача обычно решается методом проб и ошибок и является достаточно трудоемкой. Представим теперь, что модельеру надо провести коррекцию части поверхности колодки, заданной каркасом. В общем, данная задача решается аналогично двумерной задаче. Но необходимость работать не только с точками одной кривой, а с целой группой кривых и их точек в трехмерном пространстве существенно усложняет задачу проектирования, так как задать при проектировании желаемую поверхность, оперируя множеством точек в пространстве, очень сложно.

Особенностью человеческого восприятия является то, что предмет пред-

ставляется и осознается как единое целое. Дизайнеры и конструкторы не являются исключением из этого правила. Для дизайнера проще работать с проектируемым объектом (под объектом здесь понимаются линии и поверхности) как с целым, чем с его частями. При этом дизайнера в конечном итоге интересует форма конечной кривой, а не ее математические характеристики: опорные точки и касательные.

Рассмотрим некоторые подходы к разработке САПР на примере плоского объекта сложной формы. Процесс создания графического объекта представим разделенным на уровни.

Выделим следующие уровни проектирования кривой.

1. Проектирование путем изменения опорных точек кривой и касательных в этих точках. Например, форму кривой Безье можно изменять путем перемещения точек характеристической ломаной кривой.

2. Проектирование всей кривой, как единого целого. В качестве примера можно привести изменение масштаба кривой, построение эквидистанты к кривой или размерное градирование кривой. При этом модельер путем изменения одного параметра (в случае масштабирования этим параметром естественно считать коэффициент масштабирования) добивается изменения всей кривой.

3. Модификация кривой как единого целого, в том числе в отдельно выбранной конструктором ее части.

Основным отличием третьего уровня проектирования является то, что конструктор воздействует на выбранную часть кривой как целого объекта. Эта часть определяется путем задания граничных точек, за которые не будет распространяться процесс проектирования. Путем изменения одного (возможно нескольких параметров) модельер получает возможность изменять всю область кривой, не касаясь задающих ее точек, то есть, не опускаясь до первого уровня проектирования.

Рассмотрим математические методы создания имитационной математической модели деталей обуви на примере аппроксимации при помощи геометрических фигур.

Лекция 8. Аппроксимация контуров детали как способ создания имитационной математической модели объекта

Рассмотрим один из вариантов аппроксимации при помощи геометрических фигур – вписанных в объект окружностей, предложенный В. А. Скатерным. Этот способ аппроксимации он использовал для изучения условия взаимного непересечения деталей при размещении их на плоскости и оптимального варианта совмещения деталей. Он состоит в следующем.

Деталь размещают в неподвижной системе координат и вписывают в ее контур, на ее площади пересекающиеся между собой круги так, чтобы они касались контура детали (рисунок 8.1 а). Кратчайшее расстояние AC (рисунок 8.1

б) от точки пересечения двух соседних кругов до контура детали не превышало заданной погрешности e_a . Информация о детали при такой аппроксимации – это радиусы R вписанных кругов и координаты x, y их центров. Объем исходной информации, таким образом, равен $3m$, где m – число аппроксимирующих кругов.

Количество аппроксимирующих кругов зависит от сложности контура детали, ее размеров и требуемой точности, то есть допустимой погрешности задания контура. Чем больше точность аппроксимации детали, тем большее количество кругов должно быть размещено на ее площади. Однако увеличение числа вписанных фигур приводит к значительному увеличению объема вводимой в ЭВМ информации и длительности машинного времени для решения задачи.

Для определения точности задания контура был предложен показатель абсолютной e_a и фактической e_f погрешности аппроксимации. На погрешность аппроксимации существенно влияет кривизна контура.

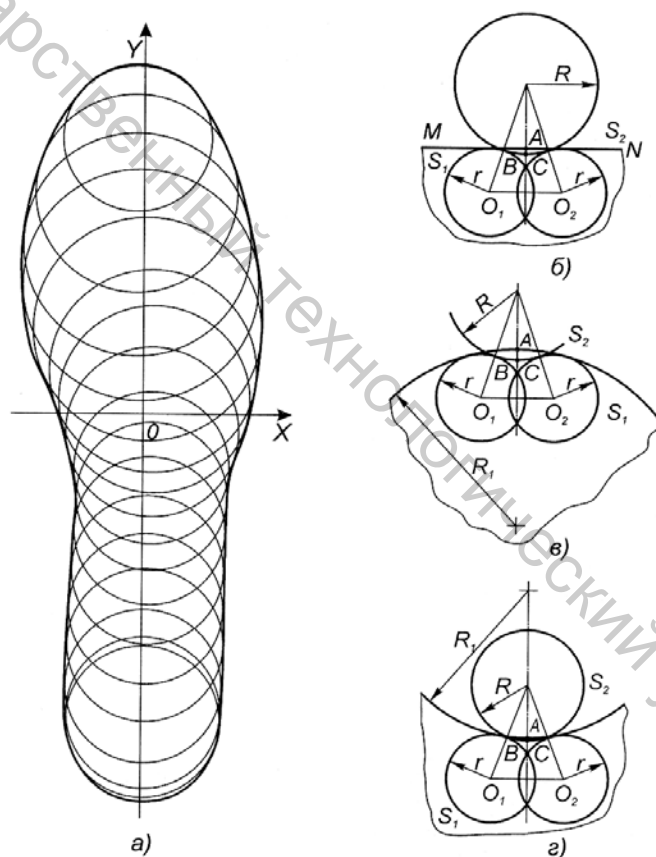


Рисунок 8.1 – Аппроксимация детали вписанными окружностями

Определим абсолютную e_a и фактическую e_f погрешность аппроксимации в трех случаях: когда аппроксимируемый участок контура детали S_1 прямолинейный, выпуклый и вогнутый. Допустим, что круг радиуса R (рисунок 8.1 б-г), аппроксимирующий деталь S_2 , при плотном размещении деталей касается

двух соседних кругов радиуса r , аппроксимирующих деталь S_1 . Для получения сравнительно простых выражений предположим, что два рядом стоящих круга, аппроксимирующие деталь S_1 , имеют одинаковые радиусы. Детали обуви имеют такую конфигурацию, что при их аппроксимации рядом стоящие круги, как правило, имеют если не одинаковые, то очень близкие по значению радиусы.

Вычисляемые теоретические значения e_a и e_ϕ при решении практических задач значительно меньше, так как при аппроксимации деталей круги расположены произвольно, то есть с различными межцентровыми расстояниями, поэтому почти исключается случай, при котором все рядом стоящие круги одной детали входят в свободные пространства между рядом стоящими кругами второй детали.

Рассмотрим случай прямолинейного контура детали S_1 (рисунок 8.1 б). Получим уравнения, определяющие значения абсолютной e_a и фактической e_ϕ погрешностей:

$$\varepsilon_a = r(1 - 1/2r\sqrt{4r^2 - d^2}); \quad (8.1)$$

$$\varepsilon_\phi = R + r \left[1 - 1/2\sqrt{4(R/r + 1)^2 - (d/r)^2} \right], \quad (8.2)$$

где r – радиусы кругов, аппроксимирующих деталь S_1 ;

R – радиус круга, аппроксимирующего деталь S_2 ;

d – расстояние между центрами O_1 и O_2 , смежных кругов.

Если контур детали S_1 выпуклый и представляет собой дугу окружности радиуса R_1 (рисунок 8.1 в), то соответственно получаем выражение:

$$\varepsilon_a = R - r/2 \left[1/r\sqrt{4r^2 - d^2} + \sqrt{4(R_1/r - 1)^2 - (d/r)^2} \right]; \quad (8.3)$$

$$\varepsilon_\phi = R + R_1 - r/2 \left[\sqrt{4(R/r + 1)^2 - (d/r)^2} + \sqrt{4(R_1/r - 1)^2 - (d/r)^2} \right]. \quad (8.4)$$

При вогнутом контуре детали S_1 представляющей собой дугу окружности радиуса R_1 (рисунок 8.1 г), получим

$$\varepsilon_a = r/2 \left[\sqrt{4(R_1/r + 1)^2 - (d/r)^2} - 1/r\sqrt{4r^2 - d^2} \right] - R; \quad (8.5)$$

$$\varepsilon_\phi = R - R_1 + r/2 \left[\sqrt{4(R_1/r + 1)^2 - (d/r)^2} - \sqrt{4(R/r + 1)^2 - (d/r)^2} \right]. \quad (8.6)$$

По уравнениям (8.1–8.3), зная радиусы кругов, кривизну контуров и межцентровое расстояние, можно определить возможную погрешность аппроксимации.

8.1 Задачи комплексного моделирования деталей обуви

Основная часть работы по созданию новых моделей ложится на моделье-

ров и дизайнеров. При решении задачи комплексного моделирования деталей обуви на стадии конструкторско-технологической подготовки производства в качестве основного носителя исходных данных о форме и размерах объекта выступает затяжная колодка. От того, насколько точно компьютерная модель будет отображать её реальную форму и размеры, зависит эффективность последующих стадий разработки конструкций: эскизирования, получения условной развертки боковой поверхности колодки и следа колодки, построения шаблонов деталей. В дальнейшем, в ходе градирования, полученные геометрические характеристики будут тиражироваться для всей серии размеров заданного ассортимента обуви.

В связи с этим одной из важнейших и трудоемких задач компьютерного моделирования обуви является задача формирования математического образа затяжной колодки. Последовательными этапами решения данной задачи будут:

- получение исходных данных в ходе обмера колодки;
- ввод и хранение в принятом виде исходных данных о форме и размерах затяжной колодки;
- формирование каркаса поверхности колодки;
- разработка алгоритма получения непрерывного описания поверхности;
- построение интерполяционной поверхности;
- визуализация графического изображения.

Получение исходных данных и их ввод всегда ставят перед проектировщиком задачу выбора максимальной точности или сокращения продолжительности данного процесса. Существующие способы и средства решения данной задачи обеспечивают её реализацию по выбранному направлению.

Рассмотрим основные методы автоматизации проектирования поверхности колодки.

Первый метод основывается на возможностях редактирования трехмерного объекта и заключается в построении кривых по точкам. Известно, что любая плоскость в пространстве определяется тремя точками, не лежащими на одной прямой. Если соединить эти точки линиями, то получим минимальный элемент поверхности. Комбинацией из множества таких граней можно образовать трехмерную поверхность рисунок 8.2.

Этот простейший метод моделирования трехмерной поверхности позволяет увидеть готовую модель рисунок 8.3.

Такой подход универсален, но необычайно трудоемок.

В целях уменьшения трудоемкости такую поверхность лучше строить поверх каркаса, созданного ранее, а также использовать метод групповой коррекции вместо поточечного редактирования.

Суть метода состоит в том, что выбирается часть поверхности, модификация которой будет производиться, а не одна точка. Далее изменяется положение одной из точек заданного участка по нормали к поверхности, назовем ее базовой точкой. После этого конструктор, используя механизм групповой коррекции поверхности, в автоматизированном режиме изменяет положение всех

оставшихся точек (дополнительных точек) в зависимости от изменения положения базовой точки. Различные варианты расположения дополнительных точек на их нормалях к поверхности задаются конструктором путем выбора коэффициента веса. Коэффициент веса характеризует величину влияния изменения положения базовой точки на перемещение дополнительных точек. Изменение коэффициента веса осуществляется простым перетаскиванием базовой точки мышью с одновременным выводом результирующей поверхности. То есть, конструктор может легко просмотреть все варианты модификации поверхности, определяемые перемещением базовой точки, и выбрать для себя наилучший.

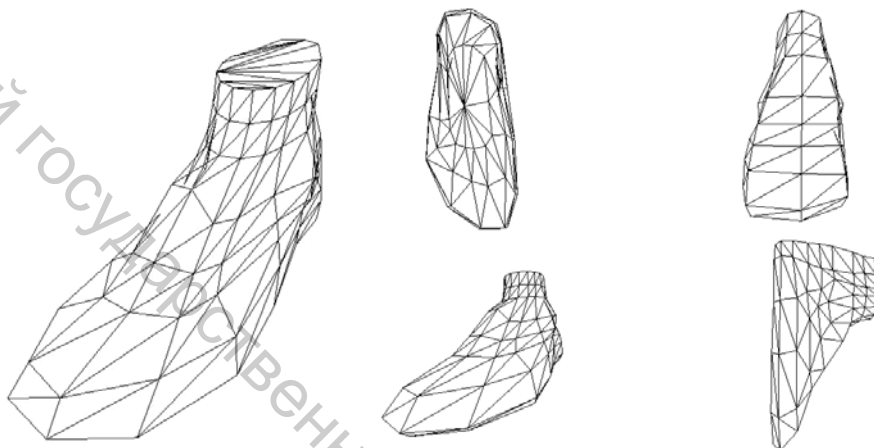


Рисунок 8.2 – Трехмерная поверхность на основе плоскостей

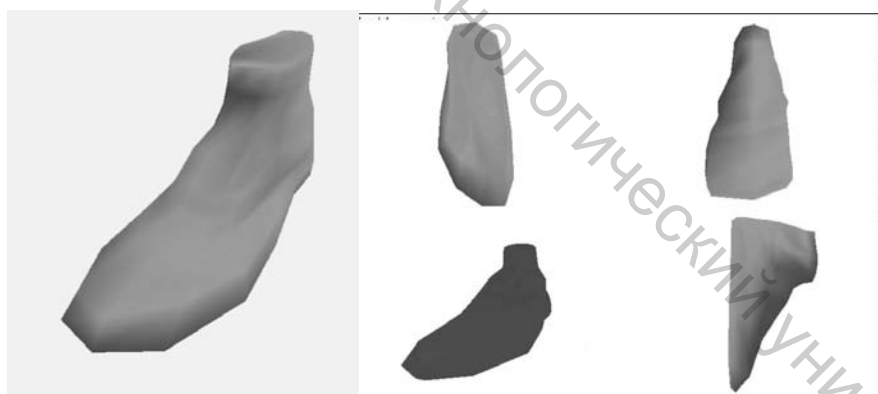


Рисунок 8.3 - Трехмерная поверхность с заливкой фактуры

Такая модификация равносильна увеличению или уменьшению «объема» производимого на данном этапе путем напайки или стачивания вручную материала с колодки.

Резко расширяет возможности модельера по проектированию поверхности наличие возможности выбора закона, по которому будет проводиться групповая коррекция. Под законом здесь понимается характер изменения величины

и направления вектора, на который перемещается дополнительная точка, в зависимости от ее удаленности от базовой точки.

Второй метод называется методом булевых операций, суть которого заключается в следующем. Объемное тело умозрительно разбивается на простые геометрические фигуры (сфера, куб, цилиндр и др.) и с помощью специальных функций сложения и вычитания одной поверхности из другой достигается соответствие первоначальному замыслу. При использовании данного метода получается погрешность при построении тела колодки. Однако при наличии базы данных, так как часто изменяется только форма носка, путем сложения двух-трех обувных колодок можно получить новую модель.

Третий метод – метод каркасного моделирования. Этот метод предпочтительнее других, так как является достаточно точным и аналогичным ручному методу, что дает возможность специалисту использовать в работе накопленные знания и опыт.

Наиболее широко при ручном производстве колодок применяется каркасная модель на основе базовых сечений (рисунок 8.4).

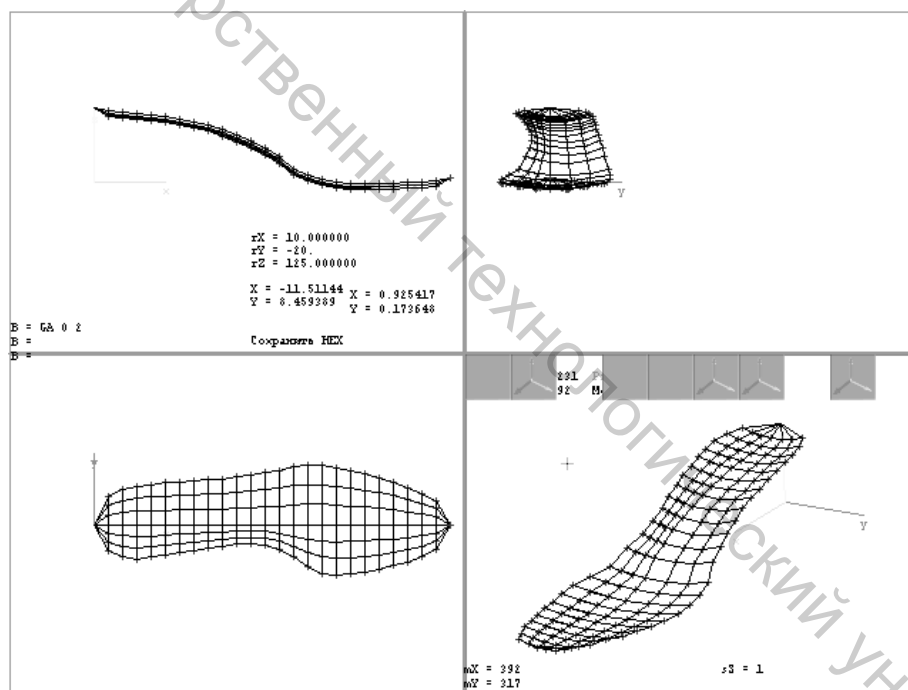


Рисунок 8.4 – Каркасная модель на основе базовых сечений

Общепринятость такого метода мы бы отметили в качестве одного из важнейших ее практических достоинств, так как САПР, основанная на ней, обеспечит более дружелюбный интерфейс конструктора и упростит внедрение.

Суть моделирования состоит в задании конечного (и всегда одинакового независимо от модели и размеров колодки) числа базовых сечений, отсчитываемых от пяточной части на расстояниях {0,18; 0,3; 0,4; 0,5; 0,62; 0,68; 0,73;

0,8}×Дст, то есть отсчитываемых пропорционально длине стопы Дст. Эти сечения отражают наиболее характерные участки колодки, по ним строят размерно-полнотный ряд, их характер определяет, в конечном итоге, модель.

С точки зрения применимости в САПР такая модель имеет ряд преимуществ. Такое упорядочивание сечений обеспечивает строгую увязку всех сечений (продольно-осевого, поперечно-вертикальных, ребра следа колодки и др.) в системе прямоугольных координат. Это особенно важно при задании данных по обмеру стопы. Кроме того, относительно небольшое количество сечений позволяет разработать математические инструменты для их автоматизированного проектирования и коррекции. Например, конструктор может одновременно работать практически со всеми сечениями.

Особенностью человеческого восприятия является то, что предмет представляется и осознается как единое целое. Дизайнеры и конструкторы не являются исключением из этого правила. Для дизайнера проще работать с проектируемым объектом (под объектом здесь понимаются линии и поверхности) как с целым, чем с его частями. При этом дизайнера в конечном итоге интересует форма конечной кривой, а не ее математические характеристики. Поэтому в процессе проектирования сечений предлагается использовать сечения на основе сплайнов (цепочек сплайнов).

Это не вызывает серьезного снижения быстродействия и позволяет достичь очень высокой точности интерполяции, а также без особого труда построить поверхности между сечениями, которые будут заданы двумя семействами кривых.

Каждый из рассмотренных подходов может быть эффективным решением задач модельера и дизайнера. Применение того или иного подхода зависит от конкретных условий производства и требований заказчика.

Получение исходных данных и их ввод всегда ставят перед проектировщиком задачу выбора максимальной точности или сокращения продолжительности данного процесса. Существующие способы и средства решения данной задачи обеспечивают её реализацию по выбранному направлению.

Формирование каркаса поверхности колодки является обязательным условием для дальнейшего создания её непрерывного математического описания. В разное время для задания поверхности колодки предлагался целый ряд видов каркасов, большинство из которых представляют собой пространственную сеть, образованную двумя семействами линий. При этом вся поверхность колодки оказывается разбитой на отдельные четырехугольные участки. Примером данных каркасов может являться каркас, используемый в одной из наиболее ранних CAD/CAM – систем (см. рисунок 8.4), созданных для нужд обувной промышленности институтом SATRA (Великобритания). В последующем данный каркас с незначительными изменениями был использован в большинстве CAD/CAM – систем. Его достоинства – простота и удобство математического описания при одновременном обеспечении необходимой гладкости поверхности. К достоинствам можно также отнести удобство получения условной раз-

вертки. К недостаткам – необходимость наличия на момент начала проектирования эталона колодки. Возможности применения данных каркасов ограничены, поскольку они не могут быть использованы для целей проектирования внутренней формы обуви и не позволяют переходить к пространственному моделированию верха обуви без наличия натурального образца колодки. В то же время данный каркас может быть получен в результате преобразования иных видов каркасов, в большей степени соответствующих традиционным способам проектирования и задания поверхности колодки. При необходимости, на заключительной стадии проектирования поверхности колодки путем несложных математических преобразований может быть получен каркас иного типа.

Подобная задача (преобразования одного каркаса в другой) решается в ходе обработки избыточных массивов данных, полученных при оцифровке поверхности колодки на трехмерных дигитайзерах. В этом случае при малой дискретности оцифровки получается массив координат, значительно превосходящий по своему объему реально необходимый для представления поверхности обводов и затрудняющий эффективную работу с данными. Минимизация количества точек, задающих поверхность объекта, осуществляется путем их фильтрации по заданному алгоритму. Так, например, возможен вариант сохранения координат точек пространственных кривых, получаемых пересечением исходной поверхности набором секущих плоскостей, заданных одним из возможных способов.

При втором подходе кривые колодки могут быть получены в ходе проектирования поверхности колодки по данным об условной средней стопе либо с помощью обмера существующей колодки на контурографе. Колодка будет представлена набором поперечно-вертикальных сечений, продольно-осевым сечением, линиями ребра, следа колодки, габарита, гранью установочной площадки. При очевидных достоинствах подобного способа (простота получения и представления в виде плоских 2D контуров) такое описание имеет существенный недостаток. Оно плохо отвечает требованиям формирования непрерывного гладкого описания поверхности, особенно в носочной и пяточной частях. Вместе с тем, данная задача решается, хотя и связана с необходимостью осуществления ряда дополнительных преобразований. Представляется эффективным следующий подход. Исходный каркас поверхности колодки, образованный набором её дискретных сечений, дополняется рядом каркасных линий, узловые точки которых выбираются по заданному алгоритму на контурах имеющихся сечений. В простейшем случае, наружные и внутренние участки контуров поперечно-вертикальных сечений разбиваются равным числом точек на одинаковые интервалы. Получаемый в данном случае каркас будет образован двумя семействами линий, первому из которых соответствуют контуры поперечно-вертикальных сечений, а второму – введенные дополнительно каркасные линии, проходящие через выбранные описанным способом точки. Проблема задания такого каркаса заключается в точности представления участков поверхности в носочной и пяточной частях. Это связано с тем, что вставка участков

поверхностей между контурами крайних поперечно-вертикальных сечений и контурами, принадлежащими продольно-осевому сечению, будет отличаться от представления участков между смежными поперечно-вертикальными сечениями. Дополнительные проблемы возникают в месте перехода от поперечных сечений, захватывающих установочную площадку колодки, к сечениям в области гребня колодки. Преодоление данных трудностей возможно путём введения дополнительных сечений и каркасных линий, при котором ряд участков поверхности вырождается в пространственные кривые, а ряд участков пространственных кривых в точки.

Выбор метода представления поверхности колодки в виде одного из рассмотренных каркасов будет связан с типом решаемой задачи. В случае использования тела колодки как базы для создания 3D эскизов высокая точность построений не требуется. При проектировании деталей верха, низа или рабочих органов технологической оснастки (пресс-форм), наоборот, к точности построений предъявляются высокие требования.

Рассмотренные принципы представления поверхности затяжной колодки каркасами различных видов и способы преобразования одного каркаса в другой позволяют в зависимости от решаемой задачи конструкторско-технологической подготовки производства обуви найти оптимальный вариант, обеспечивающий необходимую гладкость поверхности и высокую точность построений, а также обеспечивают возможность обмена данными между различными модулями CAD/CAM –систем.

8.2 Графоаналитическая модель геометрического образа обувной колодки

Для разработки базы автоматизированного проектирования внутренней формы обуви необходимо понятия, относящиеся к обувной колодке, антропометрическим и биомеханическим данным, конструкторским документом, представить в форме математических моделей, переводимых в алгоритмы и программы для реализации на ЭВМ.

В обувной, кожгалантерейной и швейной промышленности укоренилось понятие "моделирование", подразумевающее разработку модели – нового образца изделия, служащего эталоном для его массового воспроизведения, что не соответствует философской точке зрения на модели и моделирование. С позиции философии под моделированием понимается построение (или выбор) и изучение моделей-объектов любой природы, которые способны замещать исследуемый объект для получения о последнем новых знаний. Для разграничения этих понятий следовало бы колодку нового фасона, созданную в процессе натурального, графоаналитического или машинного проектирования, называть эталоном, а не моделью и применять последний термин в сочетании с определениями "математическая", "графоаналитическая", "координатно-цифровая"

(цифровая) и т.п. как некоторое абстрактное описание объекта с использованием математических понятий.

Эталон обувной колодки при всей кажущейся с первого взгляда простоте конструкции следует отнести к одним из самых сложных изделий, что связано с геометрическими особенностями ее поверхности и функциональными требованиями. Поэтому, абстрагируясь от анатомо-биомеханических и технологических связей, под термином "эталон обувной колодки" при проектировании будем понимать его геометрический образ – трехмерное тело, внешние очертания которого образованы сложными фасонными поверхностями. Геометрическое конструирование и задание таких поверхностей в пространстве на чертеже весьма сложно. Это осуществляется с помощью методов инженерной графики, центральное место в которой занимает графоаналитическая модель, позволяющая строить изображения любых фигур в пространстве.

Модельер-колодочник не вычерчивал эскиз своего изделия, часто он не умел этого сделать, подчас и объяснить, почему принял то или иное решение.

Хранилищем всей информации, собранной в ходе эволюции колодочного ремесла, являлась в первую очередь сама форма колодки. И сейчас информация хранится в виде эталонов изделий и некоторых шаблонов, а также в виде усваиваемых при обучении модельера-колодочника фиксированных навыков, необходимых для воспроизведения традиционной формы изделия. Последнее не всегда успешно выполнимо, так как в производственной деятельности человека, как и в других сферах общения, во многих случаях нет возможности описать сложные пространственные формы, примером которых являются и обувные колодки. В этих случаях человеческую мысль отражают коммуникативными средствами: знаками, символами, схемами, двух- и трехмерными изображениями.

Графическое изображение связано с конкретным предметом. В процессе познания изображение становится моделью, замещающей конкретный предмет. Изображение (модель) несет метрическую и образную информацию, закрепляющую наиболее характерные геометрические особенности предмета и являющуюся основой для его воссоздания.

Графическое изображение – это специфическое отражение свойств и форм действительности, в котором фиксируются пространственные свойства, связи и отношения предметов. Опираясь на изображения, мы имеем в виду не сами предметы, а их графические образы, в процессе представления которых активно участвуют геометрические понятия и приемы. Совокупность символов, знаков и приемов составляет систему графического изображения – чертежа. Последний, как отмечал проф. И. И. Котов, еще долго будет одним из важнейших средств общения людей в их производственной деятельности. Объясняется это тем, что чертеж, с одной стороны, дает возможность наглядного моделирования элементов пространства в их взаимодействии и движении, с другой, содержит всю информацию о любой сложной технологии изготовления изделия. Кроме того, чертеж является наиболее рациональным языком общения человека

и ЭВМ в системе автоматизированного проектирования.

Исходя из этих позиций, разработку чертежа обувной колодки, назовем его теоретическим, необходимо признать важной задачей. Понятие "теоретический чертеж" – новое для конструирования обуви, поэтому следует рассмотреть его более подробно.

В ходе развития теории и методологии проектирования внутренней формы обуви Б. П. Хохлов и К. И. Ченцова предлагали использовать чертеж колодки для графического изображения унифицированных колодок ЦНИИКПа. По сути дела эта графическая информация не являлась чертежом в том понимании, как принято в машиностроении, и представляла собой зафиксированные контуры и линии, снятые с колодки, выполненной модельером-колодочником при натурном моделировании.

В настоящее время подгонка поверхности колодки осуществляется вручную, и для того чтобы разработать эталон обувной колодки правильной формы, необходимы большой опыт и интуиция исполнителя. И все же вследствие субъективности решения форма и кривизна отдельных участков поверхности получаются незакономерными. Поэтому весьма затруднен подбор математических закономерностей для задания поверхности в целом и ее участков – "кусков", "отсеков", "заплат", как принято при разработке поверхности в прикладной геометрии.

Эта задача возникает и при повышении точности задания, изготовлении колодки и получении разверток ее поверхности, служащих основой для разработки деталей обуви. Несовершенство процесса "моделирования" колодок особенно ощущается при использовании ЭВМ и переходе к автоматизированному проектированию колодок и обуви, что обуславливает изменение методики конструирования, требует перехода от эмпирических знаний к научно обоснованным эффективным методам работы. Такие методы конструирования обеспечиваются формализацией, необходимой для алгоритмизации задач проектирования.

Более правильным с точки зрения инженерной графики и прикладной геометрии поверхности является порядок разработки эталонов колодки, обратный принятому. Первичным должен стать этап теоретической проработки поверхности обувной колодки в проекционном чертеже, построенном на основе графической и геометрической информации об условной средней стопы, данных биомеханики и физиологии, положений эстетики и дизайна. Второй этап – изготовление с использованием программно-управляемого оборудования эталона по чертежу.

Когда геометрическая информация о форме колодки сведена на чертеже, у конструктора имеется более обширное представление, чем у модельера-колодочника, который локально воздействует на поверхность объекта, формируя в данный момент лишь ограниченную часть поверхности. После каждого этапа модельер-колодочник осматривает поверхность, ощупывает ее, оценивает полученный результат и планирует следующий этап. Конструктор же по трем

проекциям может видеть форму колодки в целом, манипулировать на экране дисплея ее изображением, принципиально изменять форму, определять, как изменение одного элемента влияет на всю поверхность.

Одним из критериев оценки формы служит геометрическая увязка элементов поверхности на чертеже. Следовательно, проекционный чертеж эталона колодки можно рассматривать как легко изменяемую графоаналитическую модель взаимосвязей между элементами поверхности, являющуюся удобным инструментом геометрического конструирования в системе машинного проектирования.

В соответствии с общими правилами ЕСКД чертеж эталона обувной колодки должен представлять собой совокупность плоских проекционных изображений (видов, размеров, сечений) и служить документом, по которому осуществляются расчет и конструирование, обработка и контроль пространственной формы.

Выбор плоскостей проекций для построения чертежа основных видов подчинен требованию дать наглядное изображение обувной колодки и особенно тех элементов, суждения о которых необходимы в первую очередь. С этой точки зрения наиболее показателен вид сбоку, позволяющий оценить линии следа, гребня, пяточной части и высоту приподнятости последней. Поэтому колодку следует располагать в основной системе координат XYZ (рисунок 8.5) относительно плоскостей проекции таким образом, чтобы на фронтальной плоскости V(XZ) образовался вид на колодку со стороны боковых поверхностей, на горизонтальной H(XY) – вид сверху и на профильной W(YZ) – вид спереди. Из бесконечного множества T точек пространства эталон обувной колодки составляет конечное замкнутое множество $\emptyset \subset T$, в котором различается множество $S \subset \emptyset$ граничных точек – поверхность обувной колодки.

Каждой из точек P множества $S(P \in S)$ в выбранной системе координат соответствуют две взаимосвязанные модели пространства: с одной стороны, графическая модель в виде трех прямоугольных проекций P', P'', P''' на соответствующие плоскости XY, XZ, YZ, а с другой стороны, - цифровая модель, выражаемая тремя упорядоченными числами (координатами) $X = OP_x$, $Y = OP_y$ и $Z = OP_z$.

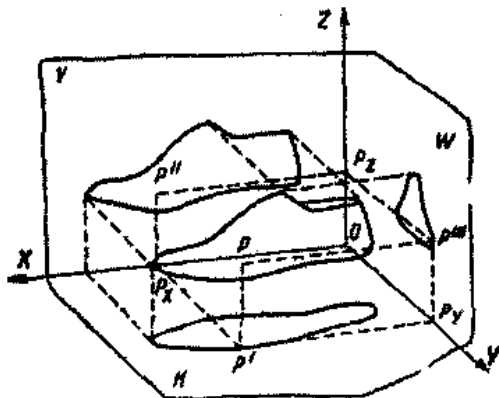


Рисунок 8.5 – Основная система координат геометрического образа колодки

Множеству S точек P поверхности соответствуют множества S', S'', S''' проекций $P, P'', P''' (P \in S)$ и уравнение $S(X, Y, Z) = 0$ поверхности S относительно координат X, Y, Z точек P , задаваемых в узлах сетки, из которых можно выделить массивы координат. Если на поверхности колодки соединить точки, имеющие одинаковые уровни по горизонтали $z = \text{const}$ и по вертикали $x = \text{const}$, $y = \text{const}$, то образуются линии соответственно продольно-горизонтальных, поперечно-вертикальных и продольно-вертикальных сечений, получающихся при мысленном рассечении колодки плоскостями, параллельными основным плоскостям проекций. Совокупность таких линий, имеющих единый закон образования и связанных определенной зависимостью, составляет каркас поверхности колодки.

Следовательно, колодку следует отнести к классу каркасных поверхностей, для задания и конструирования которых в прикладной геометрии создана каркасная теория. Выбор того или иного каркаса для создания поверхности колодки зависит от конкретных условий и требований: один каркас наилучшим образом отражает переход от формы стопы к форме колодки, другой – кинематический процесс образования поверхности, третий обеспечивает решение технологических вопросов, связанных с обработкой поверхности.

Для точного задания и воспроизведения сложной пространственной формы обувной колодки необходимо использовать три дискретных каркаса: продольно-горизонтальных, продольно-вертикальных и поперечно-вертикальных сечений. Частота расположения линий каркаса определяется геометрическими свойствами поверхности. На участках большой кривизны их должно быть больше, на участках меньшей кривизны – меньше.

Естественно, что наилучшим образом поверхность определяется каркасам, представляющим собой непрерывное множество линий. Построить такое количество образующих ручным способом не представляется возможным из-за его трудоемкости.

Для изучения каркасов лучше применить системный подход, рассматривая их как иерархическую систему – упорядоченное множество элементов, связанных между собой и образующих единое целое. Значительную роль в изучении играют такие методы, как синтез и анализ. При анализе выделяют те признаки предмета (сечения), которые делают его частью целого (каркаса), а при синтезе целое представляют состоящим из частей (сечений, элементов, точек), определенным образом связанных между собой. Существует диалектическое единство этих понятий, они дополняют друг друга, следуют друг за другом. Практически целое и части изучают одновременно: выделяя части, анализируют их как составные элементы системы, а в результате синтеза целое (система) выступает как расчлененное, состоящее из взаимосвязанных частей.

Первоначально выполняется параметрическое описание каркаса, которое является простейшей формой научного анализа, затем следует структурное описание. Эта форма исследования предполагает переход к изучению поэлементного строения каркаса для установления его иерархической структуры.

Функциональное описание исследуемого объекта является дальнейшим развитием процесса изучения объекта (каркаса). Подобное описание может быть функционально-параметрическим, если выполнено по функциональным зависимостям между параметрами, или функционально-структурным, если описывает связи между частями каркаса. Такое описание устанавливает закономерности изменения параметров и формообразования непрерывных каркасов, определяющих поверхность. Поэтому следует, как будет показано ниже, найти дискретный каркас и на его основе, исследуя закономерности формообразования линий, перейти к непрерывному каркасу, определяющему поверхность. При этом все расчеты по установленным закономерностям изменения параметров каркаса могут быть выполнены на ЭВМ.

В процессе математического моделирования каркаса обувной колодки одной из важных задач является получение аналитического описания его контуров, т. е. вычисление значений функций, входящих в математическое описание модели. Поскольку контуры сечений колодки образованы сложными локальными кривыми, которые не всегда удается описать аналитическими зависимостями, подобные вычисления могут быть трудоемкими даже при использовании ЭВМ. Поставленные проблемы решаются путем приблизительной замены функции $f(x)$ более простой функцией $\varphi(x)$, которую нетрудно вычислить при любом значении аргумента x в заданном интервале его изменений. Это и называется аппроксимацией. Задачей интерполяции в узком смысле является нахождение значений функции при аргументах, не совпадающих с узловыми, т. е., если значение аргумента расположено между узлами $x_0 \leq x \leq x_n$, то интерполирующую функцию необходимо вычислить внутри интервала. В обувной промышленности для описания контуров сечений колодки наиболее широко используются следующие методы аппроксимации:

- кусочно-линейный;
- алгебраическими и тригонометрическими полиномами;
- радиусографический;
- сплайнами.

Самым распространенным и наиболее простым является метод кусочно-линейной аппроксимации, который позволяет трансформировать кривую в ломаную путем последовательного соединения точек (x_t, y_t) прямолинейными отрезками. Однако аппроксимирующая кусочно-линейная функция не является гладкой, т. е. в узловых точках не обеспечивается непрерывность первых производных, к тому же громоздкость исходного массива влияет на сложность алгоритма, поэтому при аппроксимации поверхности колодки применение этого метода нецелесообразно. Однако кусочно-линейная аппроксимация используется во многих работах МГУДТ в основном для ввода данных о сечении стопы при автоматизированном проектировании технологической оснастки для производства обуви.

Представляет интерес применение интерполяционных методов и для проекций, и для сечений обувной колодки в виде графиков некоторых функций, за-

данных рядом дискретных значений. Пусть, например, $y=f(x)$ будет функцией, заданной на отрезке $[a, b]$ рядом значений $y_0, y_1, y_3, \dots, y_n$, которые она принимает при $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, и пусть $\varphi(x)$ обозначает произвольную, более простую функцию, принимающую для $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ те же самые значения, что и $f(x)$. Замена $f(x)$ в пределах данного интервала $\varphi(x)$ и есть интерполирование. Формула $y=\varphi(x)$, которую при этом получают, называется интерполяционной (интерполянтом).

На практике всегда выбирают в качестве $\varphi(x)$ наиболее простую функцию, которая может заменить исследуемую в рассмотренном интервале, и обычно принимают $\varphi(x)$ в виде полинома. Почти все основные интерполяционные формулы являются полиномными. Однако, когда известно, что данная функция периодична, лучше заменить ее тригонометрическим полиномом.

Теоретическое обоснование замены функции $f(x)$ тригонометрическим полиномом опирается на теорему К.Т. Вейерштрасса. Любая непрерывная функция с периодом 2π может быть заменена тригонометрическим полиномом $P(x)$, так что $[f(x) - P(x)] \leq \delta$ для всех значений x в рассмотренном интервале, причем δ есть любая заданная положительная величина.

Геометрическая интерпретация этой теоремы состоит в том, что график тригонометрического многочлена будет находиться внутри области, ограниченной кривыми $y=f(x)+b$ и $y=f(x)-b$. Тригонометрический многочлен является полным в классе непрерывных 2π периодических функций и в то же время простейшим из целых функций. Поэтому можно предполагать, что надлежащий выбор узлов позволит достаточно точно тригонометрически интерполировать непрерывные функции. Предварительное рассмотрение контуров следа, горизонтальных и поперечно-вертикальных сечений колодки, а также стельки и подошвы показывает, что составляющие их линии в определенных интервалах можно принять за графики некоторых периодических функций.

Так, В. А. Яковлев, Н. Л. Соловьев и В. А. Фукин использовали тригонометрический полином при аппроксимации контура стельки [4, 5]. При этом положение любой точки, находящейся на линии последней, будет определяться уравнениями:

$$\alpha = i \frac{\pi}{n}; \quad (8.7)$$

$$x = \frac{L}{2} \sin \alpha; \quad (8.8)$$

$$y = a_0 + \sum_1^n (a_n \cos n\alpha + b_n \sin n\alpha), \quad (8.9)$$

где a, b – постоянные коэффициенты;

x, y – координаты точек рассматриваемого контура;

n – число гармоник тригонометрического полинома.

При значениях α от 0 до 180° координаты x будут положительными, а от

180° до 360° – отрицательными. Для нахождения коэффициентов уравнения (8.9) с реальной кривой были сняты 24 координаты y при a от 0 до 360° с интервалом 15° (рисунок 8.6).

По данной методике были составлены уравнения для контуров серии стелек колодок мужской группы и рассчитаны 96 ординат каждого номера серии стелек. В 24 узловых точках, по которым рассчитались коэффициенты уравнения, отклонения расчетных ординат от фактических равны нулю.

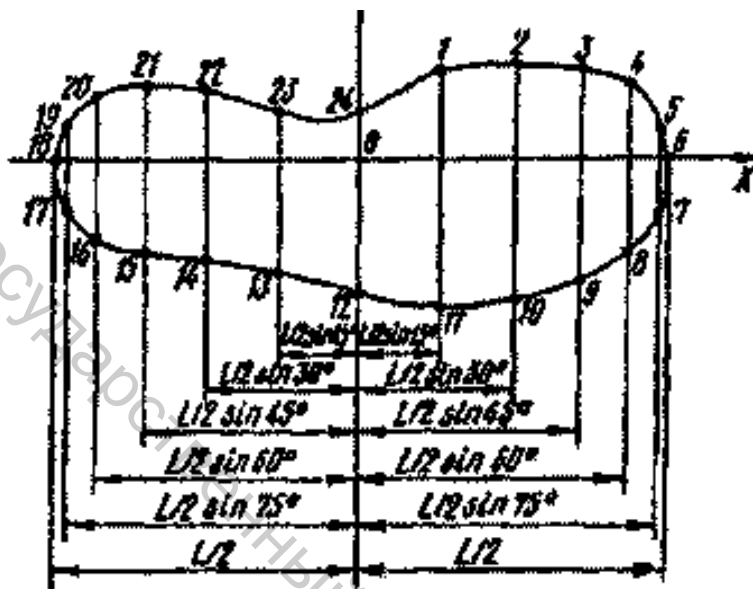


Рисунок 8.6 – Расположение узлов геометрической интерполяции контура стельки

Таким образом, предложенная методика позволяет получить аналитическое выражение контура стельки, которое может быть использовано в системах автоматизированного конструирования и проектирования внутренней формы обуви и деталей. Впоследствии тригонометрический полином был использован для аппроксимации продольно-горизонтальных и поперечных сечений колодки [6]. Некоторые сечения, проекции или их участки можно фиксировать в различных системах координат, наиболее удобных для того или иного контура. Например, при обработке на копировально-фрезерном станке колодка вращается вокруг продольной оси. Положения контактирующих точек обводного ролика и режущей кромки фрезы в отдельные моменты времени могут быть определены в цилиндрической системе координат, а траектория движения этой точки по поверхности колодки соответствует линии поперечного сечения, заданной в плоской системе полярных координат. В отечественной и зарубежной практике конструирования сечений колодок известны случаи задания плоских обводов на чертеже по дискретным точкам в такой системе координат. Поэтому вполне объяснимо стремление исследовать возможность применения тригонометрического интерполирования для непрерывного задания поперечных сечений. Мно-

гочисленные попытки рассчитать контур поперечно-вертикального сечения в прямоугольных координатах не позволили получить достаточно точные результаты из-за сложности выбора начала координат с таким расчетом, чтобы функция не меняла резко своих значений и знак на обратный. Чтобы избежать этого, в 1970 г. разработан [7] вариант использования полиномов Фурье в полярных координатах, не встречавшийся в технической литературе.

Каждая замкнутая кривая поперечного сечения колодки (рисунок 8.7), образованная конечными точками вращающегося радиуса-вектора ρ , рассматривается как функция угла поворота φ для наружной 1 и внутренней 2 сторон.

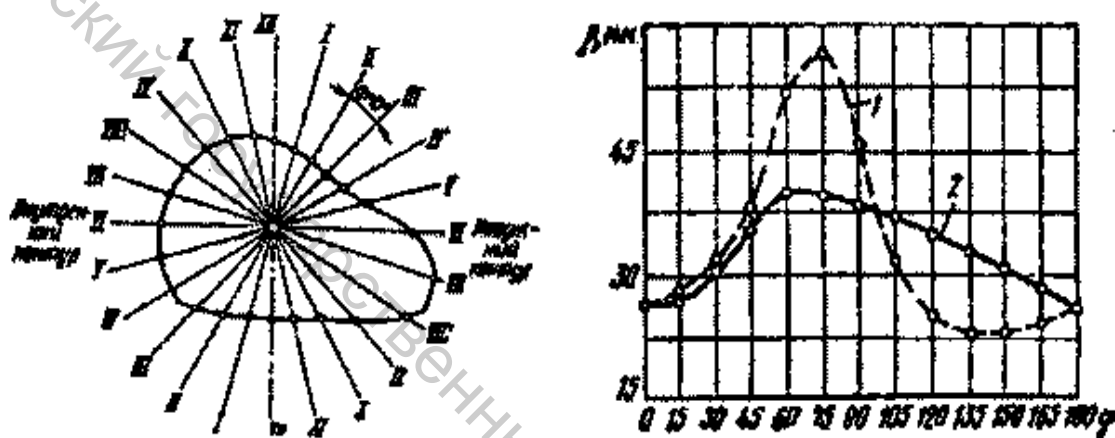


Рисунок 8.7 – Задание замкнутой линии в полярной (а) и прямоугольной системах координат

Рассмотрение в прямоугольной системе координат графика $\rho=f(\varphi)$ показывает, что эта функция непрерывна и периодична ($\rho_0=\rho_n$) и, следовательно, ее можно аппроксимировать тригонометрическим полиномом:

$$P = a_0 + a_1 \cos \varphi + a_2 \cos 2\varphi + a_3 \cos 3\varphi + a_4 \cos 4\varphi + a_5 \cos 5\varphi + a_6 \cos 6\varphi + a_1 \sin \varphi + a_2 \sin 2\varphi + a_3 \sin 3\varphi + a_4 \sin 4\varphi + a_5 \sin 5\varphi$$

Подставив в уравнение любое значение угла φ в градусах или радианах, получим соответствующее значение радиуса-вектора, конечная точка которого будет определять контур сечения.

Распространенный в настоящее время способ задания поверхности колодки каркасом поперечных сечений связан в основном с изготовлением колодки на копировально-фрезерном станке.

Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяют обрабатывать изделия в пространственной системе координат не только по поперечным, но и по продольным сечениям. Например, можно задавать поверхность колодки каркасом продольных сечений, параллельных горизонтальной плоскости, так называемым гипсометрическим методом изображения, основанным на использовании горизонталей (изогипс), проводимых через определенные ин-

тервалы выбранной шкалы сечений. В пользу такого задания поверхности свидетельствуют следующие факторы:

- высота колодки в 2-2,5 раза меньше ее длины, что позволит значительно уменьшить информацию для полного задания поверхности;
- форма обводов горизонтальных сечений по всей высоте более однородна и может быть выражена одной зависимостью;
- продольно-горизонтальные сечения предпочтительнее для сравнения впадины обуви и разработки колодки.

Б. А. Яковлев и В. А. Фукин исследовали каркас горизонтальных сечений колодки для аналитического задания и аппроксимации их контуров, установления закономерности формообразования каркаса и составления структуры математической модели геометрического образа колодки. Колодка ориентируется в системе трех плоскостей проекций X, Y, Z (рисунок 8.8).

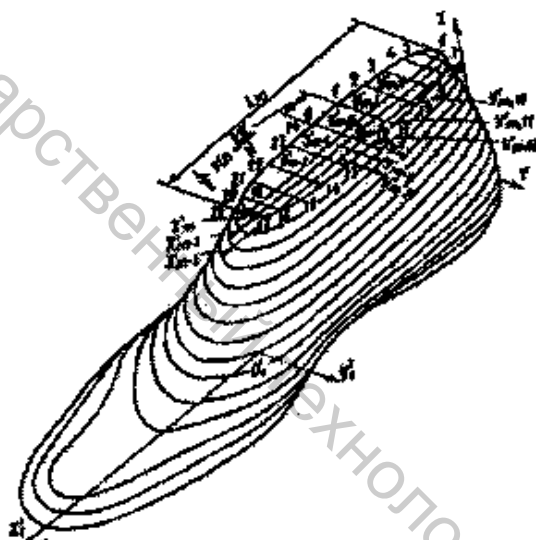


Рисунок 8.8 – Математическое задание каркаса горизонтальных сечений колодки

За исходное принято сечение, образованное базисной плоскостью колодки. Последующие 13 сечений располагаются по высоте на расстоянии $Z = 5$ мм одно от другого. Для нахождения "аналитической замены" каждое сечение рассматривается в приведенных осях $X'_m O'_m Y'_m$. Значения Y_{mj} узлов интерполяции каждого сечения снимаются при соответствующих им абсциссах $X_{mj} = L/2 \sin \alpha_j$ (m – параметр, определяющий положение сечения по оси OZ), причем учитывается знак ординаты в зависимости от квадранта. Следует отметить достаточно точное воспроизведение всех сечений тригонометрическим полиномом. Расчет и построение контрольных и произвольных сечений по специально разработанной программе показали достаточно точное совпадение расчетных и фактических данных не только в узловых, но и в промежуточных точках.

Таким образом, разработанный метод позволяет формализовать данные о

поверхности колодки и привести их к виду, удобному для машинного проектирования. Метод тригонометрического интерполирования достаточно подробно рассмотрен в работах [4–8].

Наибольший интерес представляет радиусографический метод аппроксимации контуров сечений колодки, предложенный В. А. Фукиным, при котором исследуемый контур заменяется набором дуг окружностей и отрезками прямых [8, 9]. Метод позволяет с достаточной точностью воспроизводить элементы поверхности обувных колодок. Он дает возможность установить аналитические зависимости между параметрами обводов сечений, что необходимо при алгоритмизации расчета непрерывного каркаса поверхности и последующего программного обеспечения для проектирования внутренней формы обуви (рисунок 8.9). Этот метод В. П. Лыба [10] удачно применил для изучения соотношений сечений поверхности стопы и обувной колодки.

Радиусографический метод аппроксимации контуров сечений колодки использовали во многих работах кафедры технологии изделий из кожи МГУДТ [11–13] для преобразования формы и размеров поперечных сечений в параметры одноименных поперечных сечений колодки при ее автоматизированном проектировании, так как он обладает существенными достоинствами:

- обеспечивает первый порядок гладкости сопрягаемых участков;
- нуждается в минимальном объеме исходной информации для задания контура сечения: радиусов дуг окружностей и координат точек сопряжения;
- позволяет использовать элементарные математические расчеты и преобразования, основанные на довольно простом аналитическом описании дуги поверхности;
- позволяет вручную строить контуры с помощью простейших инструментов;
- при изменении исходных данных возможно достаточно свободное модифицирование контуров обводов сечений.

Одним из наиболее современных методов проведения и описания гладких кривых является интерполяция сплайнами. Сплайн-функции обладают такими преимуществами, как универсальность, однородность и алгоритмичность. Применение сплайнов в обувной промышленности для аппроксимации контуров сечений колодки описано в работах [11–17].

Наиболее распространенным вариантом метода является интерполяция кубическими многозвенниками. В отличие от полиномиальной интерполяции, когда вся зависимость описывается одним полиномом, при интерполяции кубическими многозвенниками на каждом интервале (x_{i-1}, x) строится отдельный полином третьей степени со своими коэффициентами a , b , c и d , определяемыми из дополнительных условий, т. е. на каждом i -м участке кривая представляет собой кубическую параболу и записывается следующим образом:

$$F(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (8.10)$$

или
$$\varphi = a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + d_i(x - x_{i-1})^3; \quad (8.11)$$

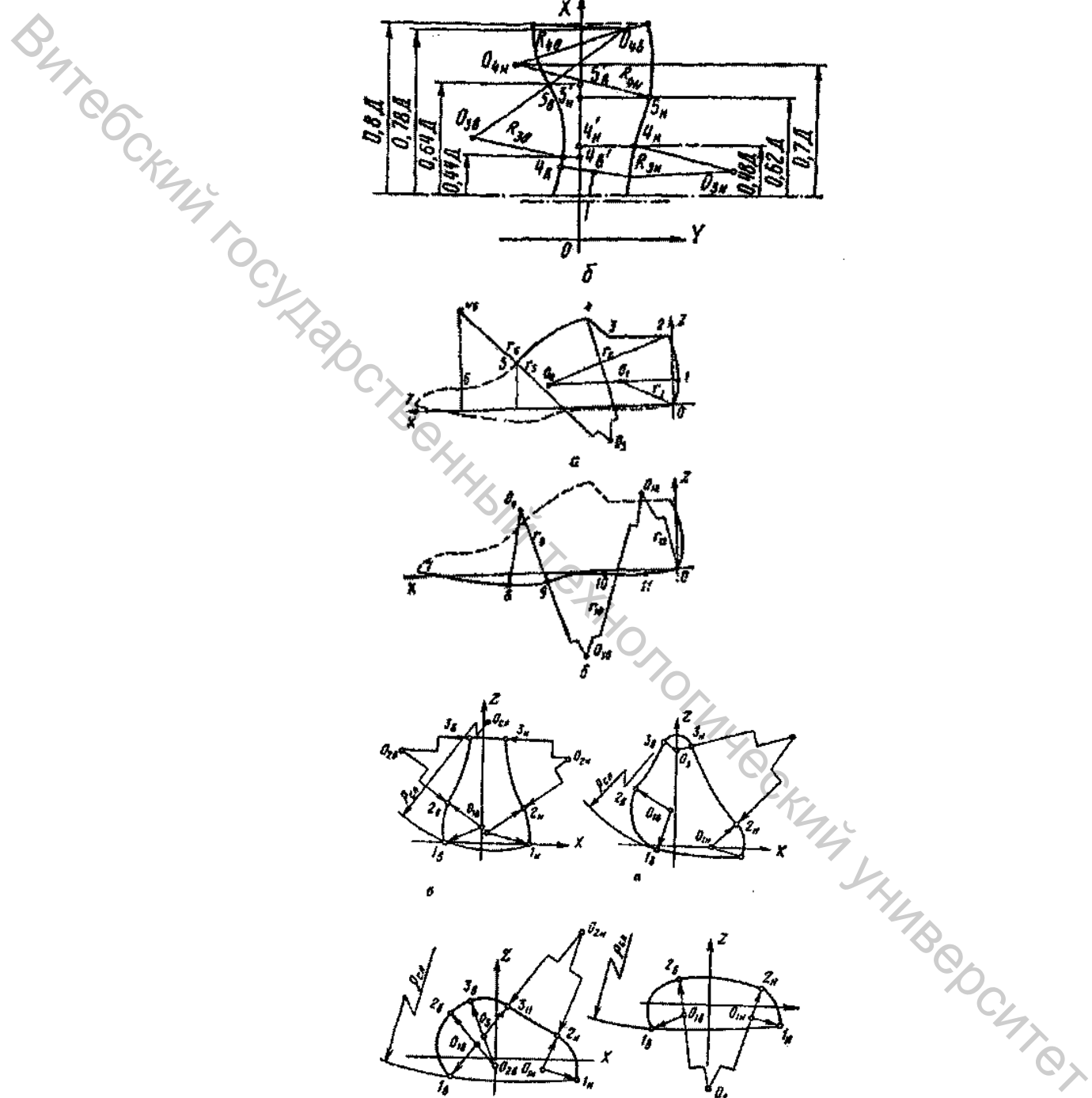


Рисунок 8.9 – Схема радиусографического конструирования контуров колодки

$$\text{в параметрическом виде: } x = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \quad (8.12)$$

$$y = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3. \quad (8.13)$$

Коэффициенты сплайна определяются из условий сшивания соседних сплайнов в узловых точках:

1) равенство значений сплайнов $\varphi(x)$ и аппроксимируемой функции $f(x)$ – условие Лагранжа:

$$\varphi'_i(x_{i-1}) = f'_{i-1}, \quad \varphi_i(x_i) = f_i$$

2) непрерывность первой и второй производных от сплайнов:

$$\varphi'_i(x_i) = \varphi'_{i+1}(x_i), \quad \varphi''_i(x_i) = \varphi''_{i+1}(x_i).$$

Для улучшения гладкости аппроксимирующей кривой используются некоторые граничные условия.

Иными словами, общая постановка задачи сводится к нахождению коэффициентов аппроксимирующего с заданной точностью сплайна, заменяющего исходный контур. Таким образом, интерполяция сплайнами обеспечивает требуемую точность воспроизведения контура, непрерывность первых и вторых производных, а также сглаживает контур. Достоинством же применения кубических сплайнов является их локальность, когда некорректное задание координат на любом участке кривой при аппроксимации приводит к искажению только этого участка и не влияет на результат в целом, что в свою очередь позволяет быстро находить ошибки ввода информации, корректировать только неверно введенные исходные данные.

На основе применения бикубического параметрического сплайна [17] разработан алгоритм проектирования вертикального габарита колодки, развертки и ребра ее следа. Доказана возможность практического применения разработанных алгоритмов при автоматизированном проектировании обувной колодки. Сплайны также успешно использованы в работах [11–13, 15, 16] в основном для интерполяции продольно-вертикального сечения колодки, ее следа, горизонтальных проекций, а также поверхностей обувных колодок и пресс-форм.

Поверхность колодки состоит из двух основных частей, характеризующихся плавным изменением кривизны: боковой поверхности и поверхности следа. Каждую из них можно назвать каркасом, образованным двумя группами параметрических u - и v -кривых. Граничные кривые элементарных участков поверхности при этом будут представлены как параметрические гладкие кривые.

Такое представление позволяет рассматривать любую поверхность как составную, каждый из участков которой однозначно задан координатами узловых точек и касательными векторами, выставленными в данных точках к граничным кривым. Необходимая гладкость поверхности достигается за счет непрерывности кривизны в местах сопряжения соседних сегментов. Узлы параметризации должны находиться на линиях изменения кривизны поверхности, что позволит получить наиболее гладкое описание непрерывной поверхности, особенно необходимое при ее автоматизированном проектировании и после-

дующем изготовлении. Для описания поверхности колодки в настоящее время известно несколько видов каркасов, образованных по принципу разбиения поверхности на геометрические элементы. В зависимости от расположения параметрических и- и v-кривых изменяется и вид каркаса (рисунок 8.10, а, б).

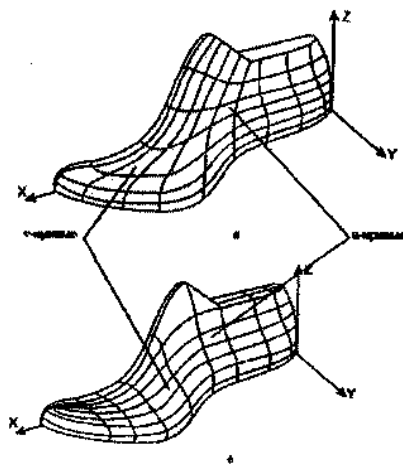


Рисунок 8.10 – Виды каркасов колодок

Достоинством такого вида каркаса является задание всей поверхности колодки набором четырехугольных элементов (рисунок 8.10, а). Недостатком же является то, что для получения координат его узловых точек необходимо с помощью специального трехмерного дигитайзера обмерить предварительно размеченную колодку.

Для последующего получения условной развертки боковой поверхности колодки, заданной таким каркасом, и проектирования деталей верха обуви используется метод триангуляции, согласно которому поверхность колодки аппроксимируется участками многогранников с плоскими треугольными гранями. При этом вершины многогранников располагаются в узловых точках каркаса поверхности.

При параллельности u-кривых плоскости YZ каркас, помимо четырехугольных участков, будет содержать и треугольные, а в ряде случаев участки могут трансформироваться в кривую или точку (рисунок 8.10, б). В то же время такое задание каркаса поверхности колодки более удобно, так как его узловые точки расположены на поперечно-вертикальных и продольно-осевом сечениях колодки, что хорошо увязывается с традиционными методами ее проектирования и представления.

Положение линий каркаса определяется проектировщиком исходя из условия разбиения поверхности на элементарные участки с плавным изменением кривизны. Для определения составляющих касательных вектор \mathbf{r}_u и их последующей коррекции каждая линия каркаса рассматривается как отдельная пространственная параметрическая кривая. При этом изменяется только один параметр, а второй остается неизменным.

Параметризация поверхности осуществляется заданием декартовых координат "текущей" точки как функции некоторых параметров t и s :

$$x = x(t,s); \quad y = y(t,s); \quad z = z(t,s). \quad (8.14)$$

Параметры t и s удобно выразить через накопленную длину хорды. В векторной форме уравнение поверхности выглядит следующим образом:

$$R = r(t,s) = x(t,s)e_1 + y(t,s)e_2 + z(t,s)e_3, \quad (8.15)$$

где $r(x,y,z)$ – радиус-векторы текущей точки на кривой;
 e – орты координат осей.

Каркасный способ задания позволяет интерполировать поверхность обувной колодки, обладает высокой универсальностью и возможностью интерпретации на ЭВМ, что успешно используется в трехмерных САПР обуви. В зависимости от принципа "сшивки" элементов поверхности поверхность колодки можно интерполировать методами Кунса, Безье, Фергюссона и др. Форма представления исходных данных, вид проектируемой поверхности также влияют на выбор математического аппарата интерполяции.

Наибольшие преимущества от внедрения автоматизированного проектирования технологической оснастки, и в том числе обувных колодок, достигаются при автоматизированном изготовлении спроектированных объектов на программно-управляемых фрезерных станках.

Пример участка интерполяционной поверхности прессовой колодки представлен на рисунке 8.11.

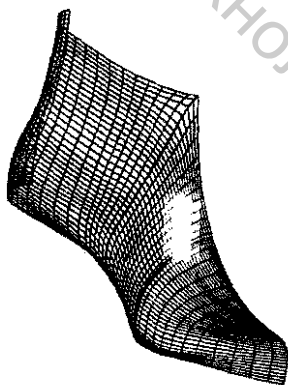


Рисунок 8.11 – Участок интерполяционной поверхности

Используя рассмотренные методы аппроксимации контуров сечений и поверхности колодки, на кафедре технологии изделий из кожи МГУДТ разработаны системы автоматизированного проектирования и изготовления технологической оснастки для обувного производства, в том числе обувной колодки.

Впервые использовать математические методы для описания конструктивных линий обуви предложили в 30-х гг. прошлого века Ю. П. Зыбин и А. А.

Рындич. Однако недостаточная подготовка модельеров, сложность ручных расчетов отодвинула внедрение аналитических кривых в конструирование обуви. Работы возобновились в середине 60-х гг., когда появились ЭВМ, позволившие широко привлечь различные математические методы. И в настоящее время конструирование обуви, проектирование обувных колодок немислимо без использования вычислительной математики.

Так, несмотря на то, что история применения колодок при изготовлении обуви уходит в далекую древность (около 700 лет до н.э.), первые попытки научного подхода к разработке колодок относятся лишь к концу XIX – началу XX вв. До настоящего времени выполнено много работ, направленных на поиск критериев оценки рациональности внутренней форме обуви, на разработку методов преобразования формы и размеров стопы в параметры обувной колодки, системы графического изображения ее элементов и системы автоматизированного проектирования. Благодаря этому обувное производство переходило от кустарного к механическому и автоматизированному. За последнее время с развитием информационной, цифровой технологии интенсивно развивается автоматизация в обувном производстве. На сегодня все процессы проектирования и изготовления обувной колодки полностью автоматизированы.

8.3 Перспективы получения развертки и проектирования верха обуви на основе 3D поверхности колодки

Инженерное проектирование обуви должно начинаться с научного решения задачи построения разверток поверхностей обувной колодки. С помощью инженерных научно обоснованных методов построения разверток возможны технический расчет и проектирование конструкций обуви, обоснование физико-механических характеристик применяемых материалов и технологических параметров процессов, связанных с получением пространственной формы и ее сохранением.

Наличие многочисленных показателей физико-механических свойств в обувных материалах явилось причиной использования при проектировании обувных заготовок верха приближенных исходных данных. В большинстве случаев при моделировании обуви пользуются так называемой средней копией боковой поверхности обувной колодки, которая является усредненной разверткой (УРК).

Математически развёртываемость поверхности определяется ее совместимостью с плоскостью или способностью быть изогнутой в плоскости [27]. Разверткой называется плоская фигура, полученная путем разгибания поверхности до полного совмещения всех ее точек с некоторой плоскостью (то же – наложение на плоскость).

С точки зрения построения разверток все поверхности относятся к классу развертывающихся и неразвертывающихся.

Развертываемыми называются такие поверхности, которые могут всеми своими точками совмещаться с плоскостью без разрывов или складок. Это линейчатые поверхности, смежные образующие которых или параллельны, или пересекаются в одной точке. Аналитическим признаком развертывания поверхностей является равенство нулю полной кривизны. Некоторые из линейчатых поверхностей, через две соседние образующие которых (занимающие положение скрещивающихся линий) нельзя провести плоскость, относятся к неразвертываемым поверхностям.

Нелинейчатые поверхности теоретически являются неразвертываемыми, однако практика вносит некоторые коррективы в приемы построения разверток. Они обуславливаются приблизительными способами развертывания, свойствами материала, технологическими и экономическими соображениями. Поверхность обувной колодки, как правило, относится к неразвертываемым поверхностям.

Существуют некоторые обязательные свойства разверток:

- каждой точке на поверхности соответствует точка на ее развертке.

Справедливо будет и обратное заключение;

- каждой прямой на поверхности соответствует прямая на ее развертке.

Обратное заключение здесь, однако, будет неверным, так как на развертке две любые точки можно соединить прямой, тогда как на поверхности линия, соединяющая две точки, не лежащие на одной образующей, будет всегда кривая;

- длины отрезков на поверхности и на ее развертке равны;

- углы, под которыми пересекаются две линии на поверхности и на развертке, равны.

Для неразвертываемых поверхностей фигура, полученная после изгибания на плоскость, не будет обладать всеми перечисленными свойствами разверток. Но такие поверхности стремятся к тому, чтобы развертки обладали хотя бы двумя из четырех перечисленных свойств. В таком случае развертки называют условными развертками поверхности (приближенными).

По разверткам, главным образом, изготавливают лекала для покрытия поверхности, которые можно получить различными способами. Размеры для вычерчивания разверток на материале и для проставления на чертеже могут быть найдены как путем вычисления (аналитически), так и графически (непосредственным измерением). Все развертки, построенные графически, являются приближенными, т. е. различие между развертками развертываемых поверхностей и приближенными развертками неразвертываемых поверхностей, построенными графически, несколько сглаживаются. Однако здесь существует принципиальная разница, так как в первом случае приближенность в построении развертки получается за счет ошибок, связанных с выполнением графических работ. Во втором случае к указанным ошибкам присовокупляется то, что развертки неразвертываемой поверхности вообще не существует, т. е. не может быть отображения нерегулярной неразвертываемой поверхности на плоскость, обладающего всеми перечисленными свойствами разверток, так как

невозможно наложить такую поверхность на плоскость без деформаций ее участков или без разрывов или складок. Направление образования этих деформаций или разрывов и складок определяет конфигурацию разверток. Из этого вытекает возможность получения множества конфигураций приближенных разверток неразвертывающихся поверхностей или их условность. Следует указать на то, что точность построения приближенных разверток неразвертывающихся поверхностей с известным уравнением поверхности имеет некоторые преимущества перед развертками поверхностей с неизвестным уравнением. Это заключается в том, что в первом случае можно аналитически определить такие параметры поверхности, как площадь и линейные размеры, дающие некоторый критерий точности построения.

Общий прием приближенного построения разверток состоит в том, что заданную поверхность разбивают на элементы и аппроксимируют (заменяют) их элементами развертывающихся поверхностей, которые и развертывают. Как правило, аппроксимирующие поверхности или описываются заданной поверхностью или вписываются в нее. Чем на большее число элементов разбивается кривая поверхность, тем ближе аппроксимирующая поверхность будет воспроизводить заданную форму.

Линейчатые поверхности обычно заменяют многогранными в виде треугольников, параллелограммов и др.; нелинейчатые поверхности, например, поверхности вращения, – цилиндрическими, коническими и др. Примером может служить разнообразие методов построения разверток сферической поверхности, они дают возможность осуществить приблизительное развертывание путем вписывания в сферическую поверхность элементов цилиндрической, конической, многогранной формой [28]. В зависимости от того, какие участки какими поверхностями заменяются, можно получить развертки различной конфигурации. Также имеется метод построения условных разверток, основанный на принципе "изгибания", т. е. плоского преобразования линейных элементов поверхности. В этом случае поверхность пересекается рядом параллельных плоскостей, нормальных к поверхности. Полученные в пересечении плоские кривые методами начертательной геометрии преобразуются в прямые на плоскости. Соединив их концы плавными кривыми, получают контур развертки.

Почти век прошел с того момента, когда австрийский обувщик Р. Кнеффель впервые предложил системный подход к проектированию верха обуви, разработаны разные методы получения развертки боковой поверхности колодки.

Большинство методов, как правило, ручных, сводилось к тому, что к поверхности колодки прикладывали бумажные шаблоны, надрезанные по разным схемам, на них отмечали линию ребра и осевую линию, заранее нанесенную на поверхность колодки, которая делила колодку на наружную и внутреннюю половины. На некоторых участках шаблона при этом получались наложения или выточки между полосами, где излишки удаляли, а недостающие участки наклеивали. Затем шаблон раскладывали на плоскости, и получали условную раз-

вертку, по которой далее проектировали детали обуви.

Шагом вперед в развитии ручных методов построения разверток стал метод проектирования верха обуви по жесткой оболочке, разработанной в МТИЛПе под руководством Ю. П. Зыбина. В качестве жесткой оболочки выбирали материал, способный принять форму поверхности колодки и сохранить ее [29]. Для этой цели использовали футор, пропитываемый клеем, термопластичный пленочный материал, изоляционную ленту (скотч) и др. Полученную жесткую оболочку снимали с колодки, делали надрезы по определенной схеме (существует много схем выполнения надрезов), распластывали на плоскость и копировали ее на бумаге. По построенной основе далее проектировали детали обуви. Точность полученной по жесткой оболочке развертки значительно выше, чем ранее используемые методы.

Для автоматизации процесса проектирования развертки обувной колодки были предложены численные методы.

С математической точки зрения развертка какой-либо поверхности представляет собой геометрическое место точек на плоскости, образованное в результате совмещения поверхности с последней. Теоретически неразвертывающихся поверхностей развертки быть не может, но, тем не менее, на практике приходится строить приближенную развертку, так как детали обуви выкраиваются из листовых материалов.

Существует два принципиально разных подхода к построению условной развертки поверхности обувной колодки машинным методом.

При использовании первого подхода контур приближительной развертки строят на основе закономерностей, выявленных при изучении разверток, полученных с различных колодок традиционными методами. При этом удается добиться достаточной точности графических построений [30]. Однако эти методы лишены гибкости и при автоматизации проектирования оказываются громоздкими. Кроме того, при расчете развертки носочной части поверхности колодки возникают погрешности, наиболее подверженные изменениям.

Предпочтительным с точки зрения соответствия получаемой развертки и поверхности следует признать второй подход, при котором поверхность разбивается на участки, ограниченные линиями каркаса, или другими линиями на поверхности, достаточно точно характеризующими последнюю. Затем выполняется ряд преобразований (чаще всего аффинных), которые приводят к развороту участков или линий на плоскость.

В работах КТИЛПа развертка строится графическим методом, при котором поверхность колодки расчленяется на элементы, условно принятые как плоские (рисунок 8.12).

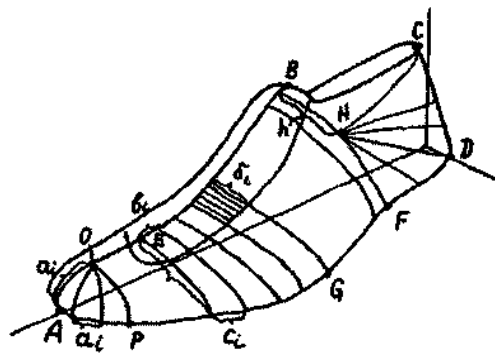


Рисунок 8.12 – Схема расположения элементов на поверхности колодки

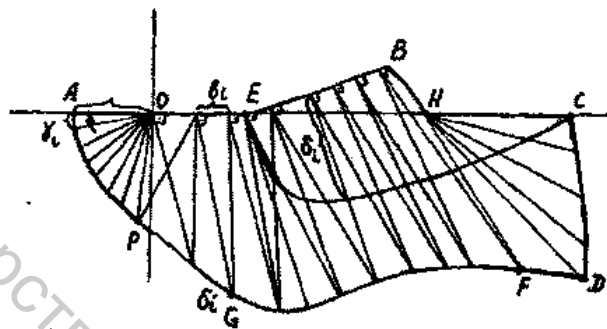


Рисунок 8.13 – Система элементов на поверхности плоскости

Таким образом, используется система элементов (треугольников и трапеций), однозначно соответствующих одноименным элементам поверхности и развертки.

В качестве расчетных параметров используются коэффициенты деформации элементов, а развертка получается последовательным вычерчиванием на плоскости элементов поверхности с учетом рассчитанных параметров (рисунок 8.13).

На основе графического метода Л.А. Тонковид [31] предложил формулы для определения координат точек плоскости модели, по которым также составлены алгоритм и программа для машинного построения разверток. Полученные развертки внешней боковой поверхности обувной колодки, построенные с помощью ЭВМ и вручную, идентичны, но развертка, выполненная машинным способом, точнее, так как координаты точек строились аналогичным путем, причем, характер построения таков, что координаты каждой последующей точки рассчитывают на основе координат предыдущей, только что построенной точки, поэтому малейшая ошибка или неточность, допущенная в начале построения, будет постепенно расти и усугубляться. Машинный метод исключает эту ошибку построения.

Аналогичный метод был использован в Чехии при построении развертки поверхности колодки. В отличие от [31] в этом методе боковая поверхность пяточной части колодки разбивается сечениями, перпендикулярными контуру ее следа. Пяточная и геленочно-пучковая части полученной развертки состоят из

прямоугольных трапеций.

В работе [32] С. М. Позмонтиром предлагается метод разворачивания боковой поверхности колодки, суть которого заключается в следующем. Поверхность колодки описывается каркасом поперечно-вертикальных сечений, каждое из которых представлено последовательностью точек, соединенных ломаной линией, т. е. применяется кусочно-линейная интерполяция. Развертка получается в результате системы поворотов сечений до совмещения их с плоскостью развертки.

Метод расчета контура условной развертки, а также способ С. М. Позмонтира наряду с достоинствами, такими как простота вычислений и алгоритмизации, имеют существенный недостаток. Это весьма приближенный характер получаемой развертки, что связано с определением развертки пространственной линии на плоскость, а, как известно, получить можно только развертку плоской фигуры (в частности треугольника), т. е. объекта с двумя измерениями. Пространственная же линия имеет только одно измерение (без учета ее толщины), что может привести к неоднозначному положению плоскости ее развертки.

В инженерной геометрии известен приближенный метод построения развертки, именуемый триангуляцией, при котором поверхность представляется записанным в нее многогранником, грань которого имеет вид треугольника, а развертка такого многогранника строится последовательным "раскладыванием" граней на плоскость.

Данный метод был использован английскими учеными для построения развертки поверхности колодки. Поверхность колодки задавалась каркасом точек (рисунок 8.14), которые являлись вершинами многогранника. При построении развертки от базовой линии выстраивали развертки групп треугольных граней (рисунок 8.15). Вертикальные плоскости, характеризующие участки многогранной поверхности на плоскости развертки, накладываются друг на друга или расходятся. Точность получаемой геометрической развертки будет зависеть от степени граненности вписанного многогранника. Недостатком рассмотренного метода является зависимость вида получаемой развертки от выбора базовой линии, схемы "рассечения" поверхности колодки на участки (полоски).

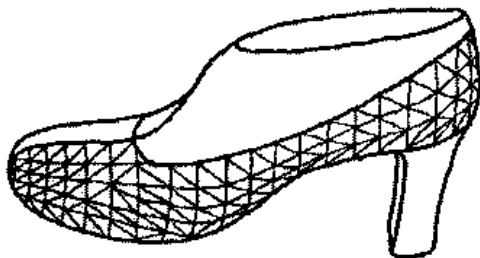


Рисунок 8.15 – Представление поверхности колодки в виде многогранников

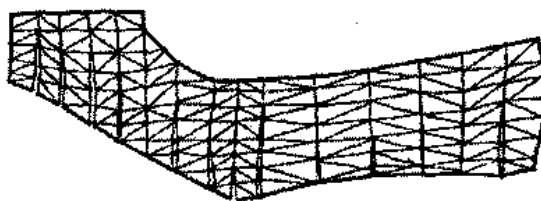


Рисунок 8.16 – Развертка поверхности колодки

Таким образом, для автоматизированного построения геометрической развертки боковой поверхности колодки могут быть использованы разные методы. В данной работе каркас поверхности колодки задан горизонталями, поэтому при построении развертки ее боковой поверхности целесообразно использовать графический метод, предложенный Л. А. Тонковидом.

На основе трехмерной боковой поверхности обувной колодки и при использовании метода построения развертки [31] был разработан алгоритм проектирования деталей верха обуви (рисунок 8.17).



Рисунок 8.17- Алгоритм проектирования деталей верха обуви на основе трехмерной боковой поверхности колодки

На первом уровне пользователю необходимо вводить исходные данные: размер обуви, приподнятость пяточной части, толщины материалов подкладки, межподкладки и стельки, ширину затяжной кромки, относительную деформацию верха обуви при формовании.

Кроме того, при использовании готовой усредненной развертки, предварительно полученной с боковой поверхности колодки, для корректировки необходимо вводить ее длину и ширину.

Перед тем как построить УРК, необходимо корректировать боковую поверхность колодки за счет толщины материалов всех деталей, которые в обуви располагаются между поверхностью колодки и наружными деталями верха и стельки. Для этого необходимо:

а) масштабировать координаты узловых точек пяточной, геленочно-пучковой и носочной частей боковой поверхности колодки с использованием коэффициентов, определяющих по суммарной толщине внутренних деталей соответствующих частей заготовки верха обуви $T_{п.ч}$, $T_{г.ч}$ и $T_{н.ч}$.

Толщины $T_{п.ч}$, $T_{г.ч}$ и $T_{н.ч}$ определяются по формулам:

$$T_{п.ч} = T_{п.б} + T_{м} + T_{ж.з}, \quad (8.16)$$

где $T_{п.б}$ – толщина подкладки под берцы;

$T_{м}$ – толщина межподкладки;

$T_{ж.з}$ – толщина жесткого задника.

$$T_{г.ч} = T_{п.б} + T_{м}; \quad (8.17)$$

$$T_{н.ч} = T_{п.с} + T_{м} + T_{ж.н}, \quad (8.18)$$

где $T_{п.с}$ – толщина подкладки под союзку;

$T_{ж.н}$ – толщина жесткого подноски.

б) перемещать контур следа колодки вниз на величину, равную толщине стельки.

Исходя из метода [31] поверхность колодки разбивается сечениями, проходящими в носочной части через центр, находящийся на линии гребня колодки; в пучково-геленочной части перпендикулярно линии гребня колодки и располагающимися друг от друга по заданному шагу; в пяточной части через центр, находящийся на боковой поверхности колодки. Развертка колодки состоит соответственно из трех частей: носочной, пучково-геленочной и пяточной. В свою очередь, носочная и пяточная части состоят из треугольников (рисунки 8.18, а), а пучково-геленочная часть – из прямоугольных трапеций (рисунок 8.18, б).

Процесс построения развертки осуществляется следующим образом.

Носочную часть поверхности колодки разбивают на треугольники с общей вершиной.

По теореме косинусов определяют угол Vt ($i = 1, 2, 3, \dots, K$):

$$V = \operatorname{arccos} \frac{E_{i-1}^2 + E_i^2}{2E_{i-1}E_i} \quad (8.19)$$

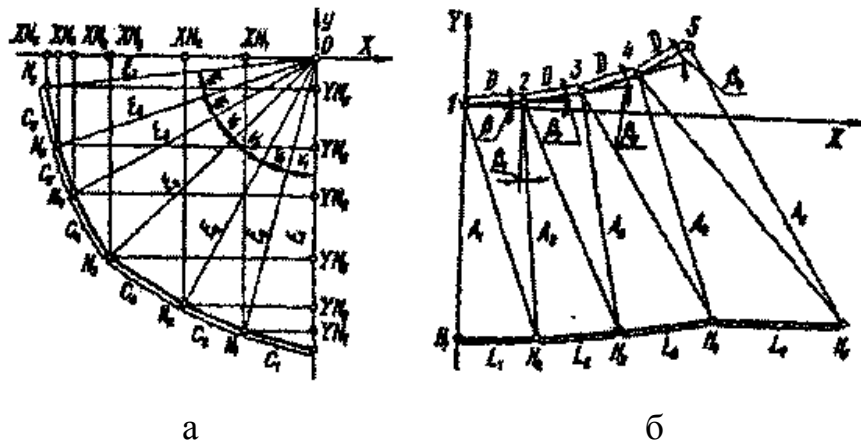


Рисунок 8.18 – Схемы преобразования графической информации в форме треугольников (а) и прямоугольных трапеций (б)

Зная длину стороны E_i и суммарный угол отклонения ее от оси y , можно определить координаты точек N_i :

$$XN = E_{i+1} \left(-\sin \sum_{i=1}^k V_i \right) \quad (8.20)$$

$$YN = E_{i+1} \left(-\cos \sum_{i=1}^k V_i \right) \quad (8.21)$$

Полученные точки N_i определяют развертку носочной части.

Развертку пучково-геленочной части поверхности колодки строят по следующей схеме (см. рисунок 8.18, б).

Координаты j ($j = 1, 2, 3, \dots, h$) точек гребня зависят от вершины угла и могут вычисляться из следующих выражений:

$$X_j = X_{j-1} + D \cos \sum_{j=1}^{j-1} \beta_j \quad (8.22)$$

$$Y_j = Y_{j-1} + D \sin \sum_{j=1}^{j-1} \beta_j \quad (8.23)$$

где X_{j-1} – абсцисса искомой точки;

X_{j-1} – абсцисса предыдущей точки;

D – расстояния между j -ми точками гребня (1-2, 2-3, 3-4, ...);

$\sum_{j=1}^{j-1} \beta_j$ – угол отклонения соответствующего участка линии гребня (1-

2, 2-3, 3-4, ...) от оси x ;

Y – ордината искомой точки;

Y_j – ордината предыдущей точки;
 Y_{j-1} – ордината предыдущей точки;

Зная координаты j -х точек гребня и линейные размеры сторон A_j , можно вычислить координаты точек H_j

$$XH_j = X_j + A_j \sin \sum_{j=1}^{j-1} \beta, \quad (8.24)$$

$$YH_j = Y_j + A_j \cos \sum_{j=1}^{j-1} \beta, \quad (8.25)$$

где XH_j – абсцисса искомой точки H_j ;

X_j – абсцисса - точки гребня;

$\sum_{j=1}^{j-1} \beta_j$ – угол отклонения соответствующей линии A_j от оси u ;

YH_j – ордината искомой точки H_j ;

Y_j – ордината j -й точки гребня.

Таким образом, для определения координат точек развертки пучково-геленочной части колодки необходимо определить угол β_j .

$$\beta_j = \arctg \frac{A_j}{D} + \arccos \left[\frac{A_{j-1}^2 + A_j^2 + D^2 - L_{j-1}^2}{2A_{j-1}\sqrt{A_j^2 + D^2}} \right], \quad (8.26)$$

где A_j и A_{j-1} – длина j -й и $j-1$ -й геодезических линий от точки гребня до ребра следа колодки;

L_{j-1} – длина ребра основания колодки, взятая от H_{j-1} точки до H_j .

Поставив полученное значение угла β_j в выражения (8.22–8.25), получают искомые координаты точек развертки пучково-геленочной части обувной колодки.

Построение развертки пяточной части колодки аналогично построению развертки носочной части, т.е. поверхность колодки разбивается на треугольники с общей вершиной, находятся координаты развертки.

Также строят контуры условных разверток боковой поверхности колодки с наружной и внутренней сторон, затем их усредняют по всему периметру [33], в результате чего получают усредненную развертку (УРК).

При формовании заготовки верха обуви на затяжной колодке пакет материалов деформируется (растягивается) как по длине, так и по ширине. Эта деформация в зависимости от вида, свойства используемых материалов, вида и конструкции обуви, способа формования заготовки верха на колодке различна. По данным авторов [74], при формовании используются следующие деформации, %, при одноосном растяжении при напряжении 10 МПа в обуви:

Повседневной	4 – 10
Модельной женской и мужской	6 – 12
Детской обуви	6 – 10.

В качестве исходных данных для корректировки УРК используется относительное растяжение заготовки верха обуви e , %, при формовании на затяжной колодке. Учитывая неравномерность распределения деформации по длине заготовки верха, длину сокращения УРК определяют по формулам:

$$1) \text{ в пучково-носочной части } \varepsilon_{д.н} = 0,7D_{урк}e; \quad (8.27)$$

$$2) \text{ в пяточной } \varepsilon_{д.п} = 0,3D_{урк}e, \quad (8.28)$$

где $D_{урк}$ - длина усредненной развертки боковой поверхности колодки.

Из-за деформации материалов верха обуви ширину УРК необходимо сокращать по формулам:

$$\text{- в пучково-носочной части } \varepsilon_{ш.н} = Ш_{н.ч} e; \quad (8.29)$$

$$\text{- в пяточной } \varepsilon_{ш.п} = 0,15Ш_{п.ч} e, \quad (8.30)$$

где $Ш_{н.ч}$ и $Ш_{п.ч}$ – ширина УРК в пучково-носочной и пяточной частях УРК.

После корректировки УРК можно правильно проектировать контур затяжной кромки, который располагается параллельно откорректированной линии развертки, соответствующей ребру следа колодки.

Исходными данными для построения осей координат, базисных, вспомогательных и контрольных линий, согласно [73], являются приподнятость пяточной колодки и длина УРК. При этом расстояние от наиболее выпуклой точки пяточного закругления УРК до базисных линий рассчитывается по уравнению

$$X' = a \cdot D_{урк}, \quad (8.31)$$

где a – коэффициенты.

Следует обращать внимание на то, что длины УРК, полученные с поверхностей колодок одного и того же размера, одной и той же группы с одинаковой приподнятостью пяточной части, имеющих разные формы носочной части, могут значительно различаться (разница $\Delta D_{урк}$ может достигнуть 4–5 см). Это приводит к тому, что положения базисных, вспомогательных и контрольных линий в системе координат могут не соответствовать анатомическим точкам стопы, поэтому в нашей работе вместо $D_{урк}$ используется размер колодки (длина стопы), мм:

$$D_{урк} = 1,1 D + 10, \quad (8.32)$$

$$\text{Тогда } X' = a(1,1D + 10). \quad (8.33)$$

Используя [33], строят оси координат, в которые вписывают УРК, базисные, вспомогательные и контрольные линии. Далее последовательно проекти-

руют детали верха, подкладки и межподкладки. При этом можно использовать банк данных в виде готовых моделей верха обуви.

Витебский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Фукин, В. А. Теоретические основы проектирования внутренней формы обуви / В. А. Фукин. – Москва : МГУДТ, 2000 – 188 с.
2. Яковлев, Б. А. Влияние исходных данных на точность аппроксимации тригонометрическими полиномами / Б. А. Яковлев [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1977. – № 3. – С. 56–59.
3. Яковлев, В. А. Составление математической модели контура стельки на основе тригонометрических полиномов / Б. А. Яковлев [и др.] // Кожевенно-обувная пром-сть. – 1977. – № 5. – С. 54–55.
4. Фукин, В. А. О математической модели поверхности колодки / В. А. Фукин [и др.] // Кожевенно-обувная про-сть. – 1979. – № 7. – С. 53–55.
5. Фукин, В. А. Применение тригонометрического интерполирования для серийного проектирования поперечных сечений обувной колодки с использованием ЭЦВМ / В. А. Фукин, Н. Л. Соловьев // Кожевенно-обувная пром-сть. – 1974. – № 1. – С. 46–49.
6. Фукин, В. А. Радиусографическое построение серии контуров поперечно-вертикальных сечений обувных колодок / В. А. Фукин, Н. Н. Омельченко // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1978. – № 2. – С. 92–95.
7. Бопеев, А. Д. Метод радиусографической аппроксимации поперечного сечения обувной колодки / А. Д. Бопеев, В. А. Фукин, Ю. П. Зыбин // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1973. – № 1. – С. 76–78.
8. Фукин, В. А. Проектирование обувных колодок / В. А. Фукин, В. В. Костылева, В. П. Лыба. – Москва : Легпромбытиздат, 1987. – 85 с.
9. Гараев, М. М. Разработка подсистемы автоматизированного проектирования и изготовления оснастки для каркасных формованных деталей обуви: автореф. дис. «Разработка подсистемы автоматизированного проектирования и изготовления оснастки для каркасных формованных деталей обуви» на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / М. М. Гараев ; Московский технологический институт легкой промышленности. – Москва : МТИЛП, 1999. – 16 с.
10. Шарипова, Е. И. Автоматизация проектирования внутренней формы обуви : автореф. дис. «Автоматизация проектирования внутренней формы обуви» на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Е. И. Шарипова ; Московский государственный ун-т дизайна и технологии. – Москва : МГУДТ, 2002. – 18 с.
11. Семенов, А. А. Автоматизированное проектирование технологической оснастки обувного производства / А. А. Семенов. – Москва : МГУДТ, 2001. – 152 с.
12. Добрышман, Е. М. Аппроксимация сплайнами контуров сечений обувной колодки / Е. М. Добрышман [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1981. – № 2. – С. 73–75.
13. Киселев, С. Ю. Разработка элементов САПР технологической оснастки обуви : автореф. дис. «Разработка элементов САПР технологической оснастки обуви» на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / С. Ю. Киселев : Москов-

ский технологический институт легкой промышленности. – Москва : МТИЛП, 1990. – 173 с.

14. Киселев, С. Ю. Автоматизированное проектирование и изготовление технологической оснастки для производства обуви и протезно-ортопедических изделий / С. Ю. Киселев – Москва : МГУДТ, 2003. – 126 с.

15. Сторожева, М. В. Проектирование внутренней формы обуви на основе машины графики : автореф. дис. «Проектирование внутренней формы обуви на основе машины графики» на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / М. В. Сторожев : Московский технологический институт легкой промышленности. – Москва : МТИЛП, 1987. – 169 с.

16. Евсеев, Г. Maya 5.0: Трехмерная графика и анимация / Г. Евсеев. – Москва : ДЕССКОМ, 2001. – 448 с.

17. Буй, В. Х. Интерактивное автоматизированное проектирование внутренней формы обуви на основе трехмерной антропометрии стопы / В. Х. Буй, В. А. Фукин // Кожевенно-обувная пром-сть. – 2005. – № 3. – С. 36–39.

18. Буй, В. Х. Программа автоматизированного проектирования верха обуви / В. Х. Буй, В. А. Фукин // Межвуз. сборник научных трудов. – МГУДТ. – 2005. – Вып. № 1. – С. 64–70.

19. Буй, В. Х. Графоаналитическая деформация каркаса поверхности обувной колодки с различной приподнятостью пяточной и носочной частей / В. Х. Буй, Фукин В. А. // Межвуз. сборник научных трудов. – МГУДТ. – 2005. – Вып. № 1. – С. 70–75.

20. Фукин, В. А. Обобщенная плантограмма условной средней стопы / В. А. Фукин // Кожевенно-обувная пром-сть. – 1978. – № 11. – С. 53–66.

21. Рындич, А. А. Об основах проектирования обувных колодок / А. А. Рындич // Легкая промышленность. – 1957. – № 4. – С. 35–38.

22. Ченцова, К. И. На пути к инженерному проектированию обувных колодок / К. И. Ченцова // Легкая промышленность. – 1956. – № 4. – С. 32–35.

23. Ченцова, К. И. Основные принципы унификации форм и размеров колодок для обуви / К. И. Ченцова // Науч. тр. МТИЛП. – Москва : Легкая индустрия. – 1962. – Вып. № 22. – С. 171–185.

24. Хорватх, Л. Разработка рациональной формы боковой поверхности пяточной части колодки / Л. Хорватх [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1967. – № 2. – С. 89–97.

25. Белянкин, И. И. Основы учения о наложении поверхностей / И. И. Белянкин. – Киев : Высшая школа, 1988. – 253 с.

26. Гордон, В. О. Курс начертательной геометрии : учеб. пособие для вузов / под ред. В. О. Гордон и Ю. Б. Иванова. – Москва : Высшая школа, 1998. – 272 с.

27. Раяцкас, В. Л. Построение условных разверток боковой поверхности обувных колодок по жесткой оболочке / В. Л. Раяцкас, Ю. П. Зыбин // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1963. – № 1. – С. 20–22.

28. Максина, З. Г. Разработка математического аппарата и алгоритма

расчета координат точек условных разверток боковой поверхности обувных колодок / З. Г. Максина [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. – 1977. – № 5. – С. 102–104.

29. Тонковид, Л. А. Расчет и проектирование обуви массового производства / Л. А. Тонковид. – Киев : Техника, 1977. – 134 с.

30. Позмонтир, С. М. Совершенствование проектирования деталей верха обуви с использованием средств машинной графики : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / С. М. Позмонтир. – Москва, – 1982. – 175 с.

31. Ключникова, В. М. Практикум по конструированию изделий из кожи / В. М. Ключникова, Т. С. Кочеткова, А. Н. Калита. – Москва : Легпромбыт-издат, 1985. – 336 с.

32. Зыбин, Ю. П. Конструирование изделий из кожи / Ю. П. Зыбин [и др.]. – Москва : Легкая промышленность, 1982. – 264 с.

Учебное издание

КОВАЛЕВ Алексей Леонидович

САПР обуви

Курс лекций

Редактор Л.А. Ботезат

Технический редактор Н.В. Карпова

Корректор Е.М. Богачева

Компьютерная верстка Л. А. Бегунова

Подписано к печати _____ Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 1.
Гарнитура «Таймс». Усл.печ. листов _____. Уч.-издат. листов _____.
Тираж _____ экз. Зак. № _____.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» 210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет»

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.