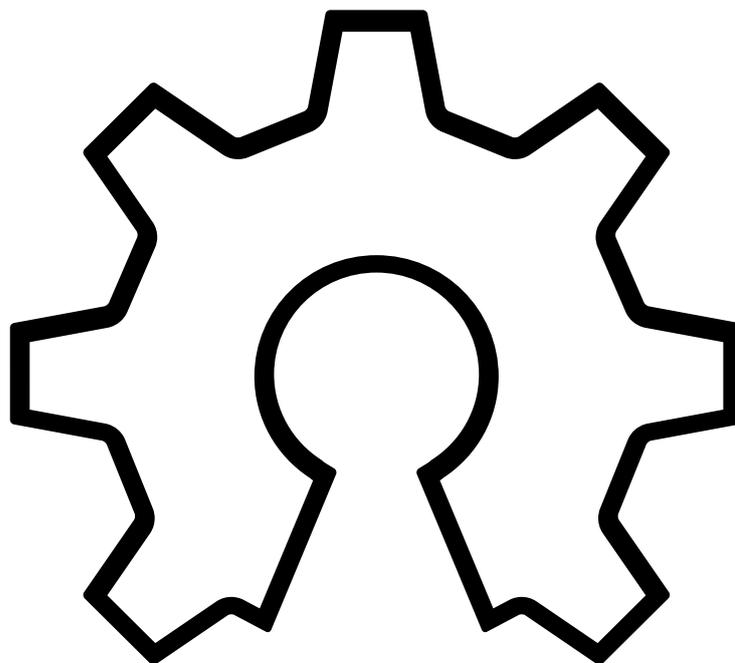


Интегрированные технологии производства и современные среды моделирования в приборостроении

А. А. ГРИБОВСКИЙ

Ю. С. АНДРЕЕВ

М. Я. АФАНАСЬЕВ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А. А. Грибовский, Ю. С. Андреев, М. Я. Афанасьев

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА И СОВРЕМЕННЫЕ
СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Грибовский А. А., Андреев Ю. С., Афанасьев М. Я. Интегрированные технологии производства и современные среды моделирования в приборостроении. Учебное пособие – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 139 с.

В учебном пособии рассмотрены современные методы обеспечения и прогнозирования качества приборов и систем, вопросы создания и функционирования малых инновационных предприятий, а также проблемы автоматизации процесса проектирования и технологической подготовки приборостроительного производства.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 12.04.01 «Приборостроение».

Рекомендовано к печати Учёным советом факультета точной механики и технологий, протокол № 8 от 08.10.13.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

Университет ИТМО, 2016

Грибовский А. А., Андреев Ю. С., Афанасьев М. Я., 2016

Оформление ссылок на Интернет-ресурсы

Для упрощения работы со ссылками на Интернет-ресурсы в данном учебном пособии используется следующее оформление:

- Все ссылки сокращены с помощью сервиса *goo.gl*.
- Каждая ссылка снабжена QR-кодом.

QR-код – это двумерный штрих-код, который может быть распознан с помощью специализированного программного обеспечения, установленного на мобильный телефон или Интернет-планшет читателя. QR-код будет особенно полезен в процессе работы с бумажной версией учебного пособия.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ.....	8
1.1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН В БИЗНЕС-ПРОЦЕССАХ ПРЕДПРИЯТИЯ	9
1.1.1 <i>Возможности современного контактного измерительного оборудования...</i>	9
1.1.2 <i>Внедрение КИМ на предприятии.....</i>	15
1.1.3 <i>Функционирование лаборатории измерения</i>	18
1.1.4 <i>Методика формирования документации по результатам проведения контроля деталей и виды специальной отчетности</i>	22
1.1.5 <i>Использование возможностей КИМ в процессе анализа результатов контроля</i>	25
1.1.6 <i>Методика хранения и представления данных, используемых и формируемых в процессе работы КИМ.....</i>	31
1.2 КОНТРОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ	33
1.2.1 <i>Способы контроля параметров шероховатости</i>	35
1.2.2 <i>Непараметрический подход к оценке и контролю микрогеометрии поверхности деталей приборов.....</i>	42
1.2.3 <i>Влияние микрогеометрии поверхности на эксплуатационные свойства деталей.....</i>	46
ГЛАВА 2. МАЛЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	51
2.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИП	51
2.2 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ	55
2.2.1 <i>Open Source CAD программное обеспечение.....</i>	57
2.2.2 <i>Open Source CAM программное обеспечение</i>	62
2.3 ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ..	65
2.3.1 <i>Использование готовых модулей-полуфабрикатов</i>	67
2.3.2 <i>Процессорные модули и отладочные платы</i>	69
2.3.3 <i>Протоколы взаимодействия модулей.....</i>	75
2.3.4 <i>Изготовление плат</i>	78

ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА.....	90
3.1 СовременНЫЕ подходы к автоматизации проектирования технологических процессов.....	90
3.2 АСТПП и CALS-подход	93
3.2.1 Параметрическое моделирование и КТЭ	96
3.2.2 Анализ трехмерной геометрии на основе STEP и трехмерных аннотаций	104
3.2.3 Поиск аналогов на основе геометрического сходства	115
3.3 Применение шаблонных бизнес-процессов при проектировании новых устройств	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МОДУЛИ СИСТЕМЫ FREECAD	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ TAPS	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОСНОВНЫЕ СУЩНОСТИ В ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ ФОРМАТА STEP	128
ЛИТЕРАТУРА	134

ВВЕДЕНИЕ

Приборостроение является основной отраслью промышленности, обеспечивающей научно-технический прогресс общества. Главными направлениями развития приборостроения являются: непрерывное повышение точности и чувствительности приборов, расширение диапазонов измеряемых величин. Современные приборы включают в себя механическую составляющую и изделия микроэлектроники, в связи с чем возникает потребность в эффективном использовании новых технологий проектирования, технологий изготовления точных деталей, электронного оборудования и средств контроля готовой продукции.

Для выпуска качественной продукции необходимо внедрять средства автоматизированной подготовки производства. Следует отметить, что стоимость таких программных продуктов достаточно высока, поэтому их использование и внедрение в производство могут позволить лишь крупные предприятия. Одним из выходов является использование открытых программных продуктов (Open Source Software). Преимущество таких систем заключается в возможности использования их без покупки лицензии, что существенно снижает расходы на технологическую подготовку производства. В результате автоматизация становится доступна даже таким структурам, как малые инновационные предприятия (МИП), что существенно упрощает процессы выпуска инновационной продукции на рынок.

Новые технологии производства позволяют повысить качество выпускаемой продукции, однако постоянная оптимизация технологических процессов производства требует новых идей, способов измерения и измерительных технологий. Внедрение современного измерительного оборудования является одним из главных направлений развития приборостроительных предприятий. Поиск факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики поверхностей деталей приборов и методов их контроля, одна из первостепенных задач производства, обеспечивающая повышение качества продукции.

В результате ключевым направлением современного предприятия выступает эффективное использование имеющихся средств подготовки, организации, производства и контроля, что требует скрупулезного планирования и моделирования процессов производства.

Данное методическое пособие раскрывает возможности современных открытых систем, предназначенных для автоматизации технологической подготовки производства, технологий производства микроэлектронной продукции и средств технологического контроля изделий приборостроения, т. е. охватывает все стадии изготовления изделий приборостроения в единичном и мелкосерийном производстве.

ГЛАВА 1

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

В современных условиях производства невозможно выпускать конкурентоспособную продукцию без обеспечения её высокого качества. Согласно ГОСТ 15467-79 под качеством понимается совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением.

Основные показатели качества изделий отражаются в государственных стандартах или технических условиях. Эти документы устанавливают единые требования к техническим параметрам и другим качественным показателям изделий, к приемке и испытаниям приборов, их транспортировке и хранению. На многие изделия электронной техники (конденсаторы, транзисторы, интегральные схемы и др.) разработаны и утверждены государственные стандарты. По некоторым видам изделий имеются общие технические условия, на основе которых разрабатываются частные технические условия, где указываются специальные и дополнительные требования к изделиям.

В приборостроении показатели качества изделий весьма тесно связаны с точностью обработки деталей приборов. Полученные при обработке размер, форма и расположение элементарных поверхностей определяют фактические зазоры и натяги в соединениях деталей приборов, а, следовательно, технические параметры продукции, влияющие на её качество (например, мощность двигателей, точность станков), надёжность и экономические показатели производства и эксплуатации.

Другим, не маловажным фактором, влияющим на конечное качество продукции, является микрогеометрия функциональных поверхностей деталей приборов.

В данном разделе будут рассмотрены вопросы контроля геометрических параметров деталей приборов и микрогеометрии их функциональных поверхностей, а так же предложены методики внедрения современного контрольно-измерительного оборудования на приборостроительных предприятиях.

1.1 Использование координатно-измерительных машин в бизнес-процессах предприятия

Важнейшим аспектом приборостроительного производства является контроль геометрии изготавливаемых деталей. Огромная номенклатура выпускаемых изделий требует максимально универсальных средств контроля. Одним из таких средств является координатно-измерительная машина (КИМ). На КИМ возможен контроль геометрии отдельных элементов, проверка их взаимного расположения в изделиях со сложной пространственной геометрией, контроль точности изготовления заданной формы поверхности или линии и т. д.

Контрольно-измерительные машины любого типа (портальные, многоосевые, измерительная рука, оптическая КИМ) являются сложными устройствами, требующими как навыков обращения с ними, так и корректно выстроенного алгоритма использования. Как и к любому средству контроля, к КИМ выдвигается ряд требований, связанных с методикой измерения, обеспечением корректности результатов и однозначности в их трактовании. Важно разделять процессы измерения на КИМ, которые в основном зависят от навыков оператора и являются достаточно универсальными для широкого круга номенклатуры изделий, и процессы контроля изделий на конкретном предприятии, требующими анализа номенклатуры изделий и принятых производственных норм, зафиксированных в виде стандартов и регламентов.

При пространственных измерениях на КИМ необходимо решить комплекс проблем по обеспечению единства измерений, включая научные, технические, нормативные и организационные составляющие метрологического обеспечения.

1.1.1 Возможности современного контактного измерительного оборудования

Большое количество изделий в приборостроении являются высокоточными. Цилиндрические головки, оборудование, электроды и другие по-

добные детали должны быть произведены с учетом жестких допусков, и контроль должен это отражать.

В мелкосерийном и среднесерийном производстве при частой сменяемости выпускаемых изделий широкое применение находят контрольно-измерительные машины: измерительные роботы и координатно-измерительные машины (КИМ). С их помощью автоматизируются процессы измерения и наладки в автоматизированных комплексах машиностроения.

Измерительные роботы – автоматические измерительные устройства, отличающиеся хорошими манипуляционными свойствами (возможностью взять, поднять, измерить, переложить и т. д.), а также высокими скоростями перемещений и измерений.

Измерительные роботы могут выполнять типовые контрольные операции: качественная оценка состава рабочей среды; установление присутствия определенных объектов, их счет, определение расположения, сортировка; оценка значения параметров деталей.

Измерительные роботы позволяют выполнять работы в труднодоступных (морское дно, космос и т. п.) и опасных для здоровья (запыление пространства, радиация, взрывоопасность и т. п.) местах, сократить утомительные операции и простои оборудования.

Широкоуниверсальные, автоматические, достаточно гибкие средства контроля – координатно-измерительные машины (КИМ) – создают новые возможности для современного производства. С их применением повышается точность и достоверность результатов измерения. Использование принципов оперативного и диалогового программирования дало возможность применения КИМ как универсального средства контроля в единичном и мелкосерийном производствах.

В КИМ используется координатный метод измерения, сводящийся к последовательному нахождению координат ряда точек изделия и последующему расчету размеров, отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат.

Измерительная головка (рис. 1.1) является одним из основных элементов КИМ, т. к. её погрешность непосредственно входит в результат измерения. Функциональные возможности измерительной головки во многом определяют функциональные возможности КИМ, классы поверхностей и объем параметров изделий, доступные для контроля. В КИМ используются различные типы измерительных головок, в зависимости от встречающихся на практике метрологических задач. В любом случае, из-

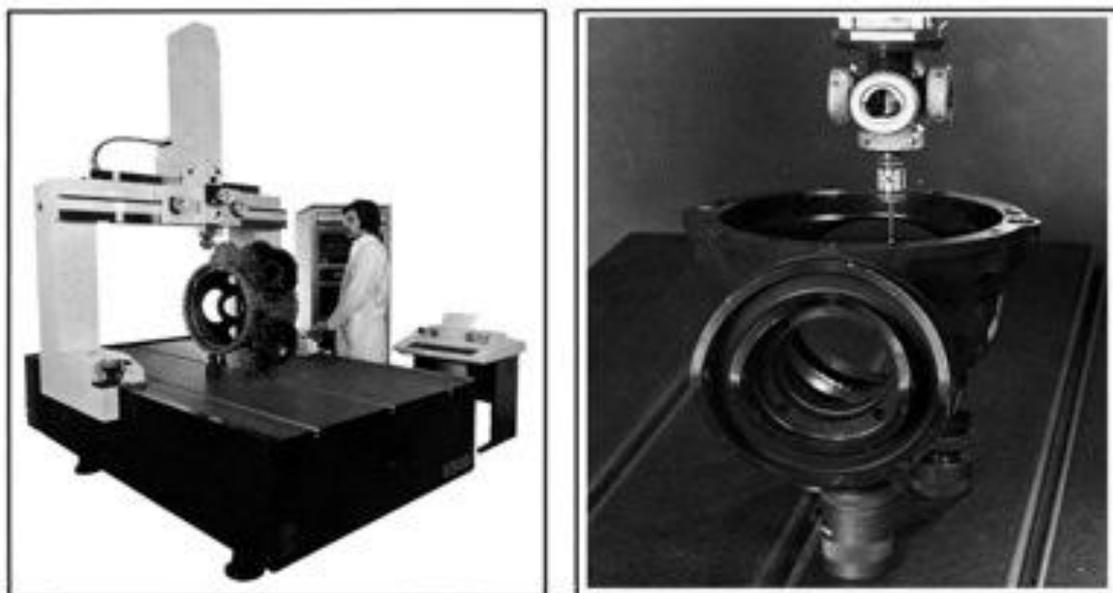


Рис. 1.1. КИМ фирмы dEA и измерительная головка

мерительная головка дает первичную измерительную информацию, на основе которой определяются размеры детали. Эта информация может быть получена или в виде фактических координат точек проверяемой поверхности или в виде отклонений этих координат от заданных в определенном направлении.

Датчики больших перемещений обеспечивают измерение перемещений измерительной головки относительно измеряемой детали по пространственным координатам X, Y, Z. Автоматическое управление перемещениями измерительной головки в рабочем пространстве КИМ осуществляется от вычислительного управляющего устройства с погрешностью позиционирования менее 0,05 мкм. Связь вычислительно-управляющего устройства с приводами перемещения измерительной головки обеспечивается различными интерфейсами. Отображение результатов измерений обеспечивается блоком цифровой индикации координат и печатающим устройством, которые позволяют оператору контролировать движение измерительной головки и выполнение программы, находясь непосредственно у измеряемой детали.

КИМ позволяет осуществить переход от контроля размеров к контролю форм в лабораторных и цеховых условиях, а также проводить измерения крупногабаритных деталей сложной формы размером до трех метров,

таких, как корпусные изделия машиностроения, турбины, пресс-формы, штампы. Для них характерны высокая точность и производительность.

Традиционные порталные КИМ – обычно самые точные измерительные средства, которые применяются в тех случаях, когда точность измерения является наиболее критичным параметром. Точность порталной машины зависит от ее устройства и от качества калибровки. Самая высокая точность возможна лишь в условиях регулируемой температуры и влажности; при любых отклонениях точность будет нарушаться. Естественно, свое влияние оказывает также вибрация от физического окружения, поэтому если целью является оптимальная точность, то КИМ не должна находиться вблизи оживленных дорог или внутри прессового цеха. На точность измерения влияет и размер машины, поскольку при увеличении размеров машины возрастает вероятность неточности измерения.

Контроль – это необходимая операция, которая требует точного исполнения и представления результатов в доступном виде. Бесспорно, важным компонентом при измерении является программное обеспечение для контроля. Например, некоторые из них позволяют использовать широкий диапазон измерительных технологий, включая контроль поверхностей свободной формы при сравнении со сложными САД-моделями. Некоторые компании, достигают большей эффективности, используя один пакет для контроля на всех измерительных устройствах для того, чтобы обеспечить постоянный машинный интерфейс, и для создания однотипных отчетов.

В процессе работы на экран монитора выводится трехмерная САД модель, положение щупа в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величина их отклонения. Это упрощает и ускоряет процесс контроля. Этот режим, так называемой итеративной привязки, используют для контроля деталей, не имеющих реальных геометрических баз (отверстий, слотов, плоскостей и т. п.).

Программное обеспечение КИМ предназначено для измерения изделий как обычным способом (для простых объектов), так и сравнивая сложные трехмерные поверхности с САД моделями. Обычно, измерительное программное обеспечение имеет графическое ядро и совместимо с операционной системой Windows.

Как уже говорилось выше, с помощью КИМ можно не просто ощупывать детали, но и сканировать их. Возможность сканирования помогает решать некоторые проблемы в измерении, например определение формы или положения. Чтобы измерить форму детали, необходимо задать боль-

шое количество расположенных на ней точек. Без сканирования этот процесс занимает достаточно много времени, при этом плотность точек оставляет желать лучшего, а используя сканирование, можно измерить огромное количество точек на любой указанной траектории, что помогает достаточно точно определить форму детали.

Контактное сканирование также имеет и некоторые недостатки. Поверхности деталей не идеальны и имеют различную шероховатость. За счет этих неровностей поверхности, в наиболее отклонившихся от номинала точках, появляются «выбросы», что создает ошибку измерений. Для того чтобы устранить эту погрешность, используются различные методы сглаживания. Из-за большой шероховатости поверхности детали щупы быстро снашиваются. Также сканирование плохо подходит для оптических деталей, вроде линз или каких-либо высокоточных (по шероховатости) поверхностей, так как после измерений на них остаются царапины.

Перед началом каких-либо действий оператор КИМ получает задание на проведение требуемых работ. В задании обычно присутствует наименование детали, ее описание, предыдущие данные ее контроля, если таковой проводился, контролируемые параметры детали, точности и характеристики помещения, в котором должен проводиться контроль. Дополнительно к заданию должны прилагаться чертежи детали, где указаны все контролируемые параметры и их допуски, и ее 3D-модель, если она разработана. Для начала работы необходимо определить состав видов конструкторско-технологических элементов (КТЭ), которые включает в себя контролируемая деталь. Как правило, даже в самой простой детали, может содержаться множество КТЭ [1], и правильное их определение будет влиять на всю дальнейшую работу оператора. У отдельного элемента детали могут контролироваться различные параметры, которые могут измеряться отличным друг от друга способом. Такие элементы разделяются на несколько отдельных КТЭ. Эти характеристики не могут быть внесены в один КТЭ, так как принципы их измерения отличаются сразу по нескольким параметрам:

- для измерения диаметра отверстия требуется всего 4–8 точек, а при измерении отклонения от соосности для более корректного измерения требуется ощупать уже 16 или более точек;
- при измерении диаметра используется всего один элемент детали, так как диаметр не зависит от каких-либо других элементов или их расположения, а для измерения соосности КТЭ должен включать

в себя два элемента: сам измеряемый элемент и базовый элемент или ось, относительно которой рассматривается измеряемый параметр.

Поэтому программы измерения должны учитывать такие варианты, то есть иметь несколько сценариев (условий проверки). Алгоритм определения КТЭ показан на рис. 1.2.

Существует несколько основных правил ощупывания КТЭ на КИМ. Любой КТЭ можно разбить на простейшие геометрические элементы: конус, цилиндр (внутренний или внешний), плоскость и сфера. Каждый из этих элементов имеет свою методику ощупывания. Например, конус и цилиндр ощупывается как две окружности в верхней и нижней части элемента (рис. 1.3), но отличие цилиндра в том, что при очень маленькой высоте для контроля некоторых параметров, его можно определить как окружность, а измерение параметров конуса в таком случае не является возможным.

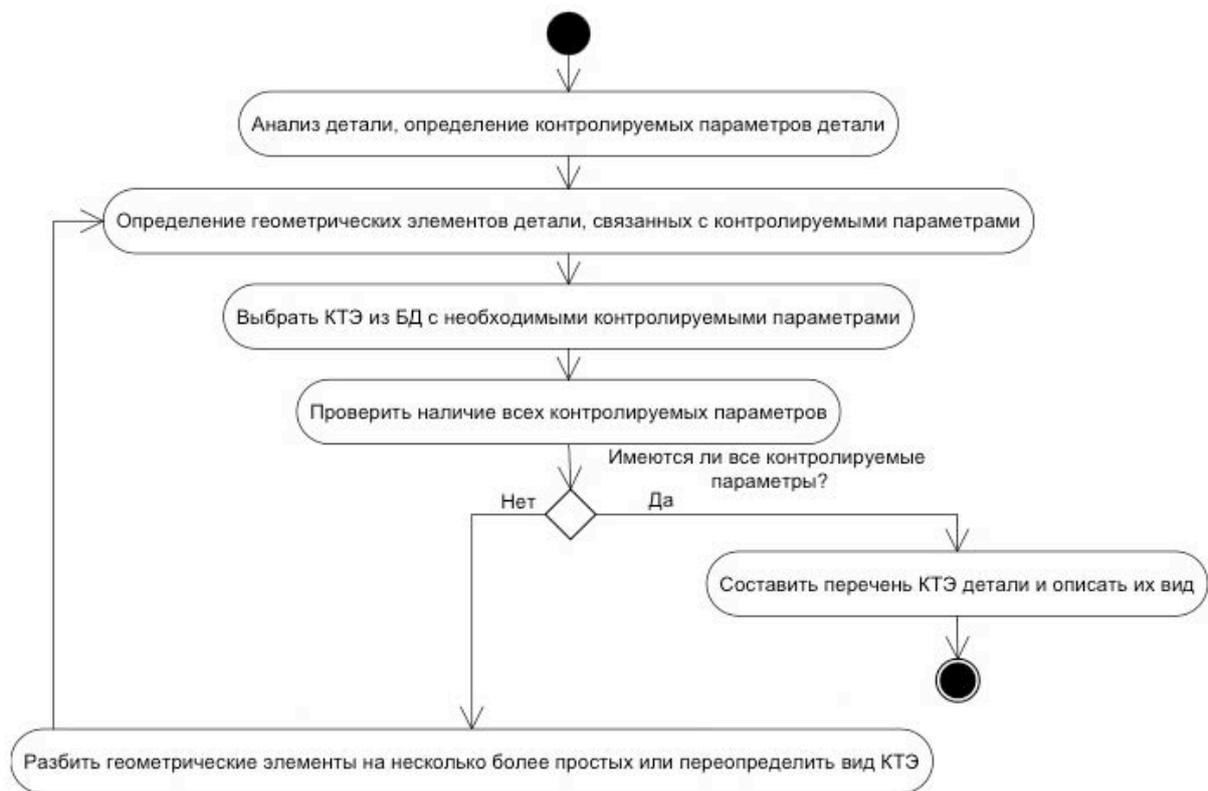


Рис. 1.2. Определение состава и видов КТЭ



Рис.1.3. Ощупывание цилиндра и конуса

Для определения плоскости требуется взять не менее трех точек в любой ее части.

В итоге приведенный подход позволяет для выбранного типа деталей простыми методами определить состав КТЭ, который позволит составить последовательность контроля и конкретную схему построения с учетом геометрических особенностей конкретной детали, состава контролируемых параметров, влияния значений параметров на конкретный метод обмера и возможностей КИМ.

1.1.2 Внедрение КИМ на предприятии

Первостепенной задачей внедрения КИМ является анализ процесса контроля деталей, принятого на предприятии. Результаты такого анализа позволяют определить ту область применения КИМ, в которой она будет наиболее эффективно использоваться.

В процессе внедрения нового измерительного оборудования на предприятии необходимо учитывать научные, технические, нормативные и организационные составляющие метрологического обеспечения, что требует выбора бизнес-процессов, в которых это оборудование будет использоваться, и с какими подразделениями предприятия будет взаимодействовать лаборатория КИМ.

Лаборатория измерения с использованием КИМ имеет неразрывную связь с цехами предприятия, которые производят детали и передают их на контроль. Данные, связанные с процессами контроля на КИМ, можно отнести к нескольким типам:

- Задание на измерение.
- Техническая документация на деталь.
- Требования к отчетности.
- Отчеты разной степени детализации.

- Также имеется материальная связь, реализуемая на следующих уровнях:
- Детали/заготовки, которые требуется проконтролировать.
- Оснастка.
- Комплектующие для обслуживания и ремонта.

Целесообразно отслеживать взаимосвязи и определять процессы взаимодействия снизу вверх. В упрощенном виде алгоритм прохождения этапов жизненного цикла изделия (ЖЦИ), связанных непосредственно с контролем, представлен на рис. 1.4.

Среди результатов, получаемых от лаборатории КИМ, основным

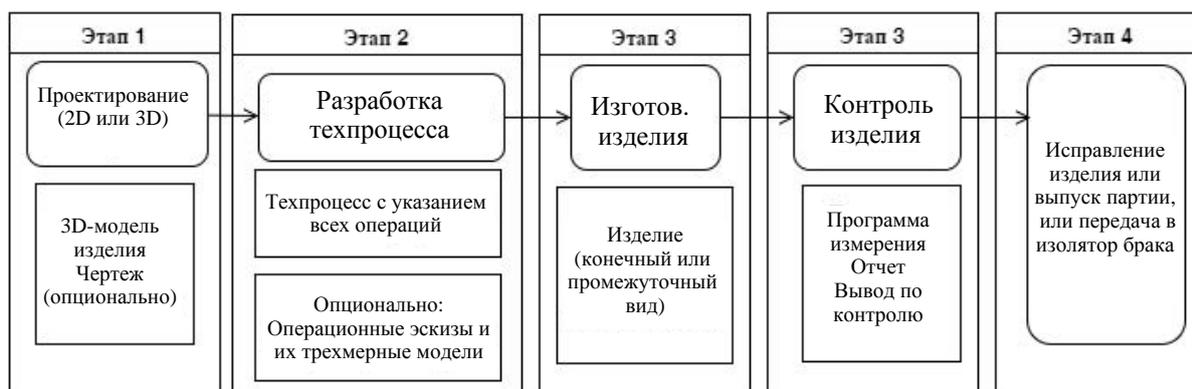


Рис. 1.4. Этап контроля в ЖЦИ

является акт, определяющий является ли деталь бракованной или нет. С точки зрения использования КИМ в качестве стандартного измерительного инструмента, применяемого на производстве, этот результат является единственным, следовательно, можно рассматривать в качестве входных данных тот же набор документации, который используется обычно, т. е. технологический процесс (рис. 1.5) с указанием операций контроля и чертежа с номинальными размерами.

В таком случае используется стандартный подход к измерению и контролю необходимых параметров с минимальным использованием возможностей КИМ.

Для полноценного использования КИМ, во-первых, необходима дополнительная информация, во-вторых, нужно иметь точное представление о требуемых от КИМ результатах, и, в-третьих, требуется разработка соответствующей методики работы с КИМ. Среди основных преимуществ использования КИМ можно выделить:

020	0200	Контроль
020	КИМ Global performance 05.07.05	
005	1. Контроль проточки по ОКК	
006	2. Внешний осмотр на отсутствие острых краев, заусенцев, рисок и т.д.	
007	3. Контролировать размеры, согласно эскизу по программе 6Т8_230_363_01_020:	
008		100%
009	#64H2	100%
010	#64H2	100%
011	#6.5H2	100%
012	#30.5H2	100%
013	#40.5-0.15	100%
014	20H2	100%
015	55-0.1	100%
016	17**	100%
ОКК	Операционная карта	2

Рис.1.5. Технологический процесс как основной элемент технологической документации

- Высокая степень автоматизации контроля деталей.
- Сокращение времени до запуска контроля первой детали в партии.
- Снижение нагрузки на оператора КИМ.
- Увеличение наглядности процесса измерения и соответствующее снижение числа ошибок при контроле.
- Повышение уровня интеллектуализации процесса подготовки программ измерения.

Основным видом дополнительных данных, необходимых для контроля с использованием КИМ, безусловно, является трехмерная модель детали. Ее применение позволяет упростить процедуру подготовки программы измерения и непосредственного контроля за счет использования примитивов (рис. 1.6).

Использование КИМ предполагает не только финальный контроль детали, но и ряд промежуточных измерений. В связи с этим необходима разработка трехмерных моделей заготовок, т. е. между отделом конструкторов и отделом технологов кроме существующей прямой связи с передачей трехмерной модели устанавливается также и обратная связь, организуемая для обеспечения трехмерными моделями заготовок на основе сформированной технологии изготовления.



Рис. 1.6. Контроль примитивов на КИМ с использованием системы PC-DMIS

На рис. 1.4 можно выделить получение отчетов и выводов контроля, которые могут использоваться для различного рода анализа, включающего как отбраковку некачественных деталей, так и более глубокое исследование на предмет исправления брака или изменение техпроцесса для получения годных деталей.

Рассматривая детально процесс взаимодействий структурных подразделений предприятия, следует особо выделить организацию контроля деталей. Здесь требуется учесть как развитие лаборатории КИМ, так и специфику продукции, выпускаемой предприятием.

1.1.3 Функционирование лаборатории измерения

Основные задачи лаборатории измерения заключаются в:

- предотвращении выпуска предприятием бракованной продукции;
- укреплении производственной дисциплины;
- повышении ответственности всех звеньев производства за качество выпускаемой продукции.
- К основным функциям лаборатории измерения относятся:
- Контроль за качеством и комплектностью изготавливаемых предприятием деталей, узлов и готовых изделий.

- Контроль соответствия стандартам, техническим условиям, нормам, эталонам и чертежам.
- Клеймение принятой и забракованной продукции.
- Оформление в установленном порядке документации на принятую и забракованную продукцию.
- Контроль за изъятием из производства окончательно забракованных деталей в специально организованные изоляторы брака и сдачей их в отходы.
- Анализ и технический учет брака и дефектов продукции предприятия, отмеченных в рекламациях и протоколах испытаний.
- Участие в разработке и контроль за осуществлением мероприятий, направленных на предупреждение возникновения брака и устранение дефектов.
- Выявление лиц, виновных в изготовлении недоброкачественных деталей.
- Разработка программ измерения.
- Обеспечение надлежащего состояния средств измерения.
- Обеспечение качества выполняемых работ.
- Соблюдение основных правил проведения технического контроля деталей.
- Организация и внедрение прогрессивных методов контроля и оценки качества продукции.

Функционирование лаборатории основывается на следовании следующим нормативным документам:

- Методика проведения измерений на КИМ.
- Регламент работы в лаборатории измерения.
- Методика формирования специализированных видов отчетности.
- Правила хранения и представления данных, необходимых для работы лаборатории измерения.

Таким образом, функционирование лаборатории можно представить в виде совокупности функциональных и организационных схем. Роль лаборатории видна как в процессе изготовления изделия (рис. 1.4), так и в организационной модели предприятия (рис. 1.7). В зависимости от объектов измерения возможны различные сценарии работы оператора. Более детально это продемонстрировано в виде бизнес-процесса на рис.1.8.

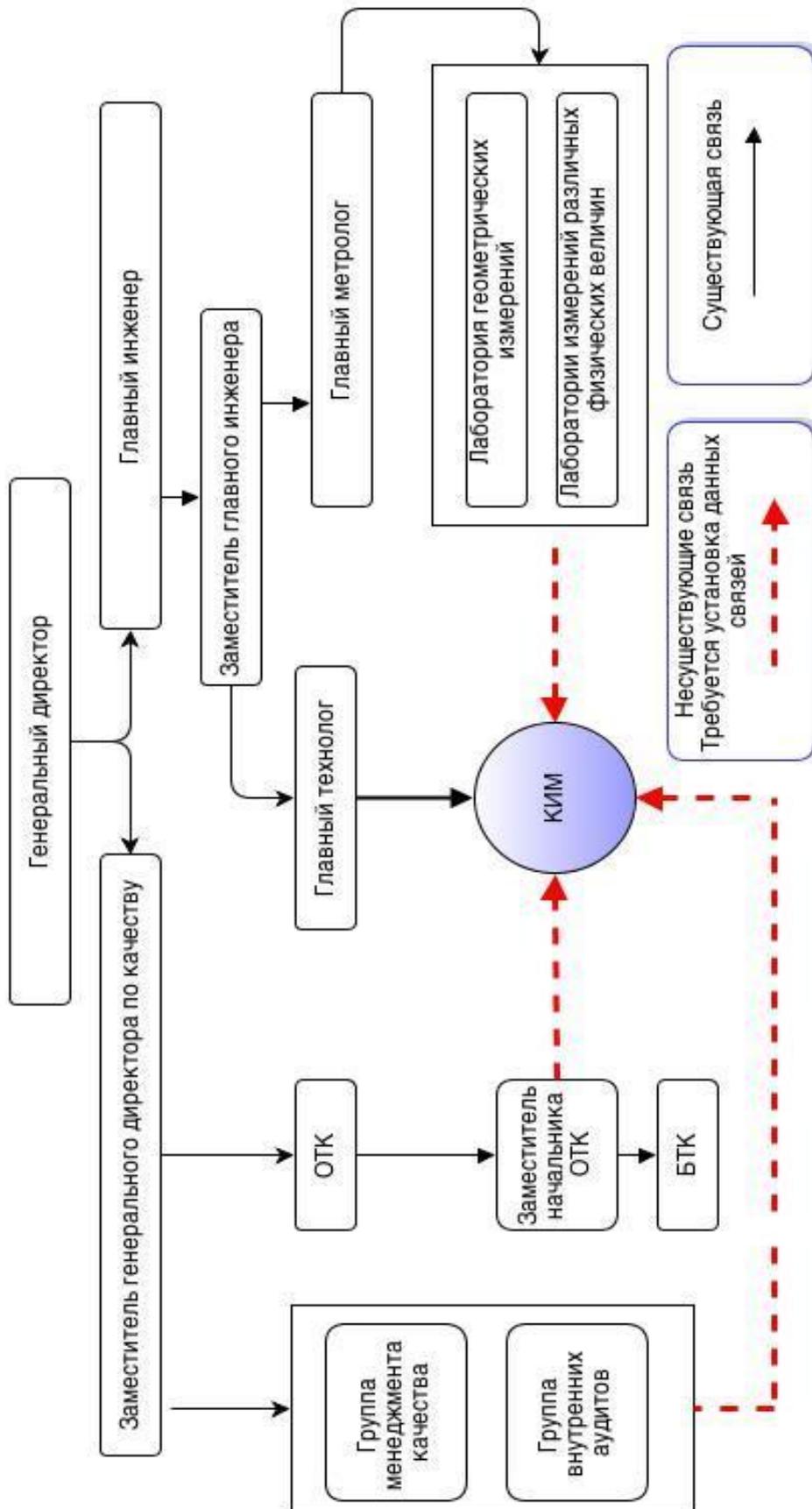


Рис.1.7. Пример взаимодействия лаборатории измерения с подразделениями предприятия

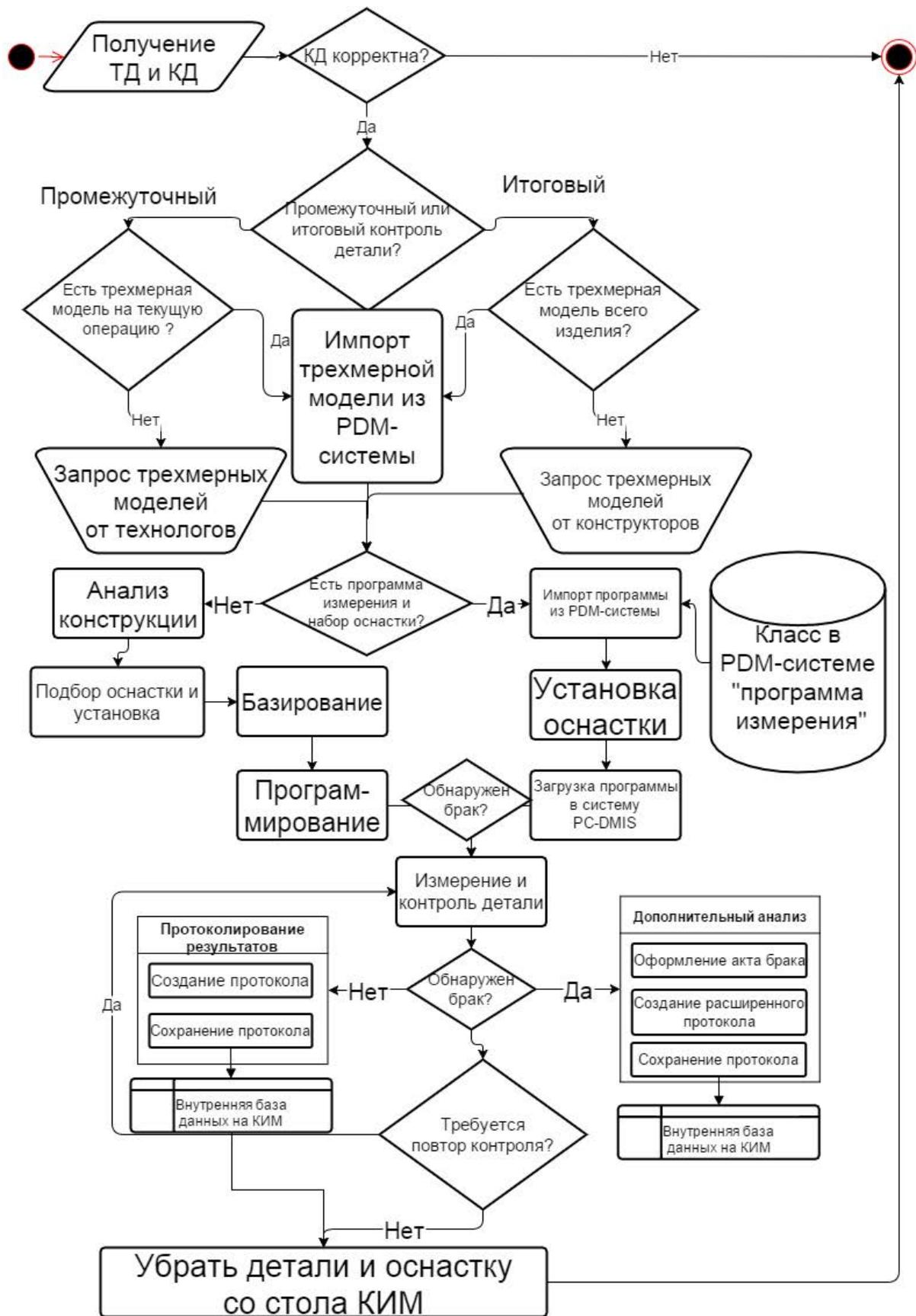


Рис.1.8. Процесс осуществления промежуточного и итогового контроля

1.1.4 Методика формирования документации по результатам проведения контроля деталей и виды специальной отчетности

Контроль деталей на КИМ включает в себя подготовительный, организационный и программный этапы, а также процедуры непосредственного контроля детали и вывода результатов.

- К подготовительному этапу в первую очередь следует отнести запуск КИМ.
- Организационный этап включает в себя изучение полученной технологической и конструкторской документации, контролируемых деталей, а также подбор или подготовку необходимой оснастки и инструмента.
- Программный этап включает в себя все действия, которые необходимо произвести для подготовки управляющих программ КИМ к измерению в автоматизированном режиме и для подготовки шаблонов протоколов измерения.
- Завершающий этап непосредственно контроля детали связан с процессами базирования детали на рабочей поверхности, процедурами закрепления, привязкой детали к системе координат оборудования, и процессов измерения, который выполняется в автоматическом режиме по трехмерной модели детали.

В зависимости от степени детализации и необходимых сведений об измеряемых величинах формируются различные виды протоколов с соответствующей степенью информативности.

Основными технологическими документами, регламентирующими процесс контроля, являются:

- Маршрутная карта технологического процесса.
- Операционная карта контроля.
- Карта эскизов.
- Сопроводительный ярлык изготовления деталей.

Маршрутная карта

Содержит информацию об оборудовании, на котором выполняется операция, шифры специальностей рабочих и их квалификацию.

Операционная карта контроля

Операционная карта контроля предназначена для описания технологической операции с указанием выполняемых переходов, режимов работы и данных об инструментальной оснастке.

В данном документе указываются:

- размеры, которые требуется контролировать на КИМ;
- номер программы измерения;
- номер трехмерной модели (детали/операционной заготовки);
- применяемая оснастка;
- описание щуповой головки;
- номер сферы для калибровки щупа;
- дополнительная информация о требованиях к безопасности.

Последовательность создания операционной карты в системах САПР ТП показан на рис. 1.9.



Рис. 1.9. Создание операционной карты при контроле на КИМ

Карта эскизов

Карта эскизов контрольной операции с использованием КИМ состоит из двух частей:

1. Карта наладки, в которой указываются схема базирования детали на столе КИМ, элементы базирования, «нуль» заготовки, направление осей.
2. Карта эскизов измерения, содержащая эскиз детали, на котором указаны размеры, подлежащие контролю и таблица примитивов, необходимых для получения значения измеряемой величины.

Последовательность действий процесса создания карты эскиза представлена на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Создание карты эскиза при контроле на КИМ

Создание карты наладки начинается одновременно с разработкой схемы базирования детали на рабочей поверхности КИМ. После анализа конструкции детали и поиска примитивов технолог принимает решение сколько потребуется положений детали на рабочей поверхности оборудования для измерения всех размеров, руководствуясь следующими правилами:

1. Базирование детали должно полностью исключать сдвиг или перемещение детали во время контроля.
2. Схема базирования должна быть простой и использовать для реализации наиболее доступные поверхности детали с целью минимизации количества дополнительной специальной оснастки.
3. При создании схемы базирования необходимо учитывать перемещения измерительной головки и заранее предусмотреть возможные столкновения с зажимными элементами.
4. Зажимные элементы не должны препятствовать подводу измерительной головки к элементам, которые используются для привязки детали к системе координат оборудования.
5. При разработке схемы базирования следует совмещать систему координат детали с системой координат оборудования.

Порядок заполнения карты наладки состоит в следующем:

1. Создание эскизов в САД-системе на каждый установ с указанием размеров примитивов, за которые будет происходить зажим (цилиндр, конус, плоскость и т. д.).
2. Построение графических элементов базирования.
3. Добавление нулевой точки детали с указанием направления осей координат.

4. Построение дополнительных элементов (плоскостей безопасности, нулевой точки КИМ, присоединительных размеров)
5. Экспорт сформированных САД данных в САПР ТП.
6. Сохранение карты наладки в формате «.pdf».

В случае большого количества контролируемых размеров необходимо таблицу примитивов оформлять на отдельном листе операционного эскиза.

После выполнения процедуры контроля оператор КИМ ставит отметку в сопроводительном ярлыке на изготовление детали/партии деталей, а также формирует протокол измерения. Виды, возможности и алгоритмы создания таких протоколов рассмотрены в следующем разделе.

При эксплуатации КИМ возможно создание двух типов отчетности:

1. Отчет результатов измерения детали.
2. Специализированные отчеты.

Отчет о результатах измерений

По завершении измерения детали результаты измерения должны быть представлены в виде, доступном для анализа. Программное обеспечение КИМ по умолчанию сохраняет результаты в виде стандартного отчета, именуемого протоколом измерений, который содержит полные данные по каждому из элементов детали, измеренных в процессе выполнения программы. Этот протокол можно распечатать или сохранить в виде файла для дальнейшего просмотра.

В большинстве случаев стандартный протокол измерений полностью удовлетворяет потребности пользователя.

Специализированные протоколы

Специализированные формы отчетности – это дополнительная информация, необходимая оператору КИМ для проведения измерения и упрощающая подготовку протокола измерения.

1.1.5 Использование возможностей КИМ в процессе анализа результатов контроля

Документация, используемая при контроле на КИМ, может быть как конструкторской, так и технологической. Если документация некорректна, то либо появятся ошибки¹ в детали, либо станет невозможным про-

¹ Не только несоответствия точности, но и несоответствия геометрии.

водить контроль по представленным данным. Отсюда следует разделять несоответствия КД и несоответствия ТД. К несоответствиям конструкторской документации относятся ошибки на чертеже или на трехмерной модели.

Ошибки на чертеже могут быть следующих типов:

- наличие лишних размеров (без указания размеров для справок или с явными противоречиями между размерами);
- несоответствие видов (разные виды отображают один и тот же элемент по-разному, то есть имеется явное визуальное противоречие);
- недостаточное количество видов или размеров (для некоторых элементов либо отсутствуют размеры, либо часть видов, позволяющих точно определить параметры и геометрию детали).

Ошибки на трехмерной модели выражаются в виде несоответствия трехмерной модели чертежу и могут быть следующих типов:

- отсутствие элементов (не все элементы детали, имеющиеся на чертеже, отражены на трехмерной модели);
- лишние элементы (на трехмерной модели есть элементы, которые отсутствуют на чертеже);
- несоответствие размеров и формы элементов (некоторые размеры явно не соответствуют чертежу, что приводит к искажению формы детали, или некоторые элементы имеют форму не соответствующую чертежу, например, вместо цилиндрической поверхности на чертеже в трехмерной модели имеется конусная поверхность, которая появилась из-за несовершенства системы трехмерного моделирования, либо из-за ошибки конструктора).

При поступлении конструкторской документации с ошибками, во-первых, становится невозможным произвести по ней контроль, а во-вторых, ставится под вопрос корректность изготовленной детали в целом, так как возможность изготовления детали по некорректной документации, тем более по документации с недостаточным количеством данных, сомнительна.

Ошибки в технологической документации выражаются в виде несоответствий управляющей программы (управляющая программа, не соответствующая технологическому процессу на деталь) или операционных заготовок в виде трехмерных моделей (трехмерные модели для промежуточного контроля не соответствуют либо полному чертежу, либо эскизам на операции).

Несоответствия в технологической документации могут стать одной из причин появления брака, поэтому их стоит проверять в первую очередь.

В результате контроля детали она может быть признана:

1. годной;
2. деталью с исправимым браком;
3. деталью с неисправимым браком.

При этом от детали к детали в одной партии и, тем более в разных партиях, может меняться точность. В лучшем случае будут появляться детали с исправимым браком и издержки окажутся минимальными. Однако возможно появление и неисправимого брака детали в рамках одной партии. В такой ситуации необходим дополнительный анализ, носящий статистический характер, т. е. предполагающий анализ изменения характеристик деталей от выборки к выборке с прогнозированием наступления брака исправимого или неисправимого.

С другой стороны, такой анализ позволяет ответить на вопрос «когда появится брак», но не на вопрос «в чем причина брака». Определение причин брака является нетривиальной задачей для специалистов, не имеющих большого опыта, или для случаев, в которых обычно точность обеспечивается настройкой станка.

Контроль традиционными средствами отвечает в основном на вопрос «имеется ли брак» и в редких случаях может дать дополнительную информацию об особенностях выхода параметров за пределы допуска. КИМ даже в стандартном протоколе измерения, получаемом автоматически по результатам контроля, предоставляет сведения не только о выходе размера за допуск, но и демонстрирует, на сколько тот или иной параметр может находиться в пределах допуска даже при снижении точности производства.

Расширенные средства анализа в современных КИМ включают:

- специальные инструменты построения гистограмм отклонений;
- наглядные средства сравнения математической модели с реально измеренной.

На базе использования инструментария КИМ можно выделить следующие виды анализа:

Статистический анализ

По каждому параметру в протоколе отображается запас допуска или то на сколько выбивается размер из поля допуска (рис. 1.11). Для случаев

исправимого брака или отсутствия брака такие данные позволяют проследить колебания параметров и процесс их изменения.

Расширенные данные важны для формирования статистики либо в одной партии, либо «между настроенными деталями». По ним можно заранее определить момент, в который может начаться появление брака (исправимого или неисправимого), и предпринять соответствующие действия.

Например, может быть увеличена выборка из деталей, и их контроль будет производиться чаще, либо будет запущен процесс анализа причин таких изменений и при необходимости будет проведена коррекция технологии изготовления.

Так, если по анализу статистики видно, что размер требуемой партии недостаточно большой, чтобы выйти за рамки допуска можно, либо отменить какие-либо дополнительные действия, или реже контролировать детали, разгрузив КИМ для проведения других измерений.

Таким образом, появляются обратные связи во взаимодействии между отделами измерения и изготовления деталей, что повышает динамику производства.

«Размерный» анализ

В данном случае результаты предоставляются в виде протокола контроля параметров. Даже на таком уровне можно проследить не только на

ИМЯ ДЕТАЛИ : 06.720.90		ОСЬ		НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.
НОМЕР РЕДАКЦИИ : первый устан		↔	М	31.000	0.100	0.100
↔		ММ	31+0,1/-0,1_ПОВТОР - ПП ОТНОСИТ. ЛЛ			
ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
М	31.000	0.100	0.100	30.912	-0.088	0.000
↔		ММ	12,25+0,1/-0,1 - 3,4 ОТНОСИТ. 2_1 (ОСЬ_Y)			
ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
М	12.250	0.100	0.100	12.324	0.074	0.000
ИМЯ ДЕТАЛИ : 06.720.90		НОМЕР РЕДАКЦИИ : первый устан		ПОРЯДОК НОМЕР : 2	25 марта, 2013	15:03
↔		ММ	31+0,1/-0,1 - ПП2 ОТНОСИТ. ЛЛ2			
ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
М	31.000	0.100	0.100	31.018	0.018	0.000
↔		ММ	31+0,1/-0,1_ПОВТОР - ПП ОТНОСИТ. ЛЛ			
ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
М	31.000	0.100	0.100	30.954	-0.046	0.000
↔		ММ	12,25+0,1/-0,1 - 3,4 ОТНОСИТ. 2_1 (ОСЬ_Y)			
ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
М	12.250	0.100	0.100	12.374	0.124	0.024

Рис. 1.11. Статистический анализ по нескольким деталям из одной партии

сколько выбиваются из допуска те или иные параметры (рис. 1.12), но и какой запас допуска у корректных параметров. Таким образом, можно выявить причины брака по связи параметров.

«Дублирующий» анализ

Применение других методик при контроле параметров. Такой анализ связан с особенностью программного обеспечения современных КИМ.

Ось	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
M	31.000	0.100	0.100	31.018	0.018	0.000
←→ мм 31+0,1/-0,1 ПОВТОР - ПП ОТНОСИТ. ЛЛ						
Ось	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
M	31.000	0.100	0.100	30.954	-0.046	0.000
←→ мм 12,25+0,1/-0,1 - 3,4 ОТНОСИТ. 2_1 (Ось. Y)						
Ось	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
M	12.250	0.100	0.100	12.374	0.124	0.024

Рис. 1.12. Анализ параметров по шкалам отклонений

Возможны три уровня дополнительного контроля:

- Повторение контроля исходным способом несколько раз для отсеивания случайных погрешностей.
- Применение других методик контроля, которые обладают схожими показателями корректности (при их наличии).
- Применение других методик контроля, которые обладают заниженными показателями корректности (при их наличии проводится предварительная оценка целесообразности).

Смена методики контроля связана с изменением 3-х параметров:

- Изменение направления или последовательности размерных цепей между элементами.
- Изменение типа контролируемого параметра.
- Изменение входящих в контролируемый параметр элементов (смена элемента на другой, связанный с ним элемент более высокого или низкого уровня).

Для всех способов контроля необходим предварительный анализ на образцах высокой точности.

«Смежный» анализ

Процесс выяснения причин брака может начинаться с контроля смежных связей, т. е. для контроля используются уже измеренные элементы, но в таких комбинациях, которые с одной стороны еще не учитывались, а с другой – дадут дополнительную информацию для анализа.

Также возможен другой вид смежного анализа, когда в дополнении к существующим элементам производится обмер ряда вспомогательных элементов и сравнение с ними.

Смежный анализ может дать хорошие результаты без глубокого изучения проблем в тех случаях, когда производится дополнительное сравнение с элементами, участвующими в закреплении детали, либо являющимися технологической базой (для тех случаев, когда технологическая и конструкционная базы не совпадают).

Графический анализ

Характерной особенностью современного ПО, используемого совместно с КИМ, является возможность построения графических отображений проведённых измерений. Такая опция является полезной при наличии большого количества измерений, что позволяет их анализировать в наглядной форме (рис. 1.13). Особенно такая возможность полезна для связанного набора данных, полученного с использованием сканирования поверхности. График наглядно демонстрирует разброс размеров и, зачастую, позволяет достаточно точно оценить погрешности формы (при ее контроле).

Анализ на основе реверс инжиниринга

Верхний уровень постобработки модели. Требует большого количества измерений с получением множества данных, на основе которых (после преобразования) строится трехмерная модель. Данная модель сравнивается с моделью, полученной в CAD-системе по всем необходимым параметрам.



Рис. 1.13 Диаграмма отклонений формы поверхности детали от цилиндричности в различных представлениях

Например, подобная методика сравнения позволяет анализировать точность в сечениях, дающих наглядную информацию для сложных деталей (например, крыльчатки, струезавихрители и т. п.). В результате бизнес-процесс анализа будет выглядеть так, как показано на рис. 1.14.

1.1.6 Методика хранения и представления данных, используемых и формируемых в процессе работы КИМ

Алгоритм работы с данными является неотъемлемой частью общего бизнес-процесса контроля детали. Его можно представить в виде схемы на рис. 1.15.

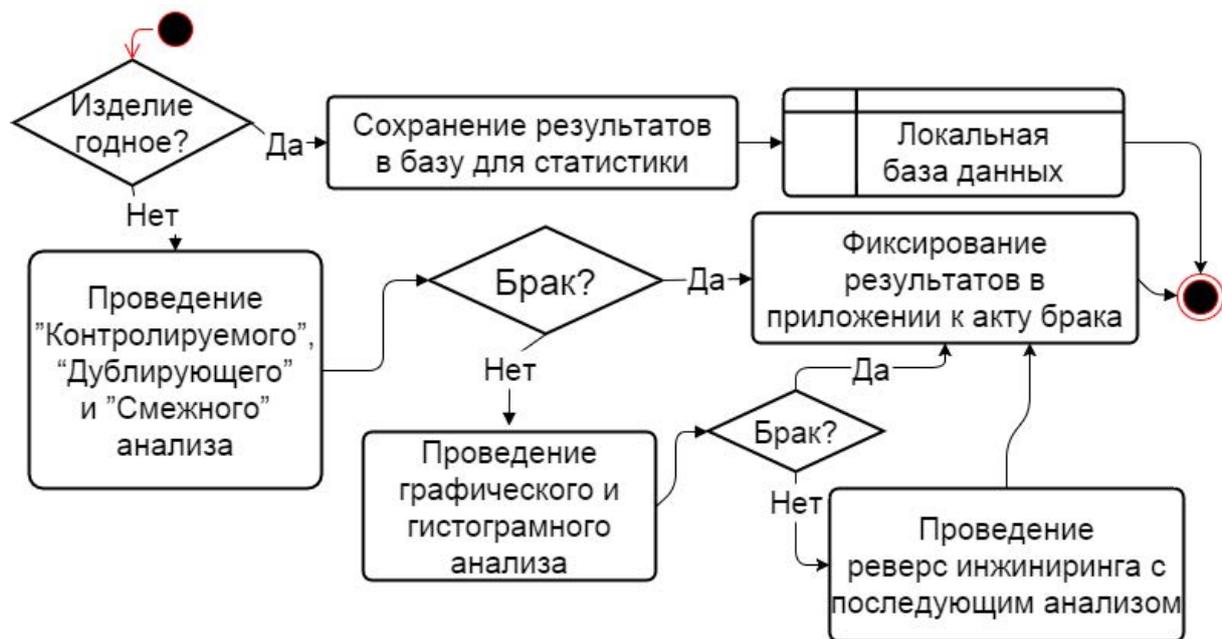


Рис. 1.14. Диаграмма анализа с использованием особенностей и средств ПО КИМ

Из схемы видно, что имеется четыре основных процесса, в которых используется один тип данных, а генерируется другой. Так, в первом процессе производится получение данных из различных источников. Эти данные являются входной документацией.

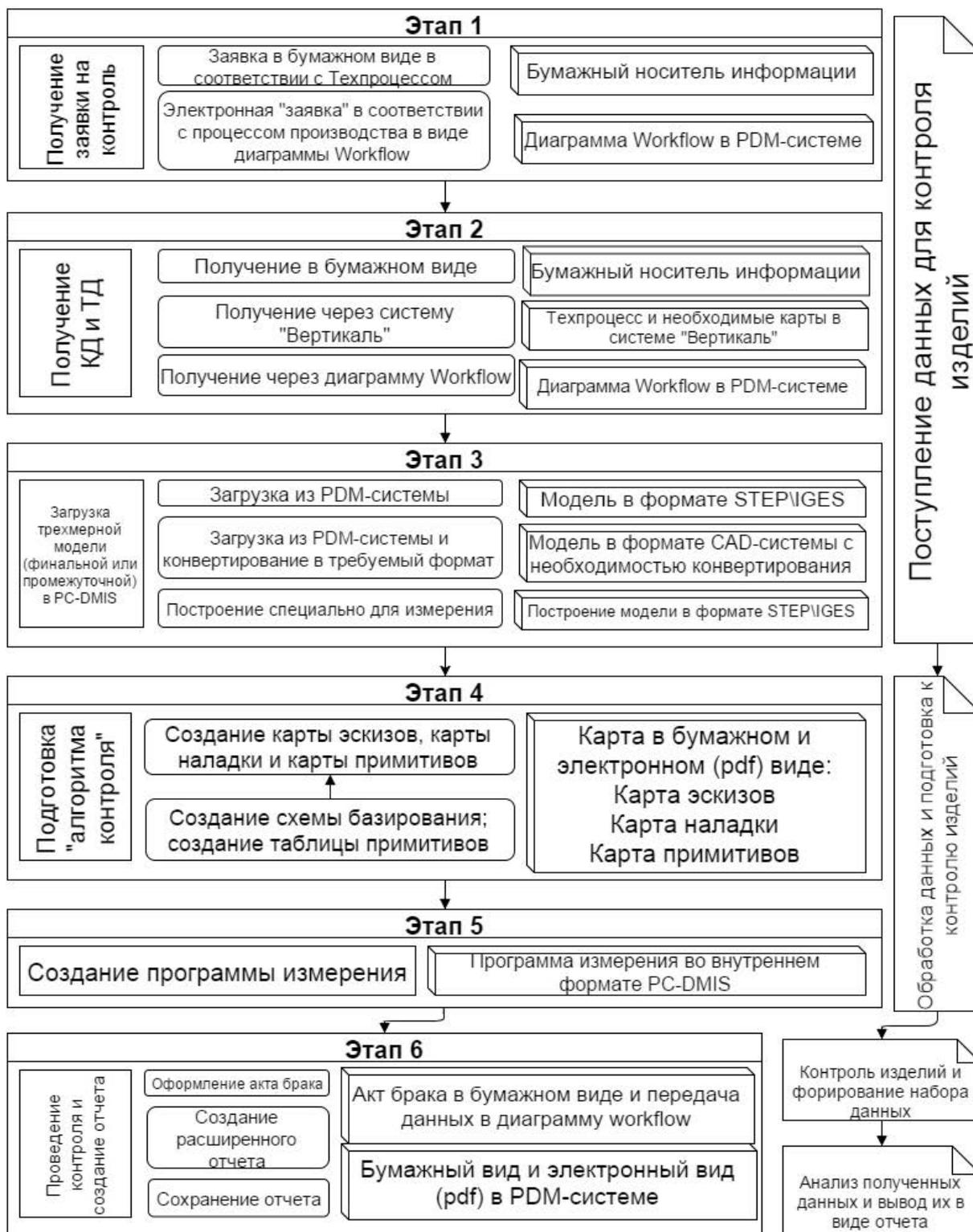


Рис. 1.15. Контроль деталей с точки зрения использования документации

Их формирование должно производиться на стадии конструкторской (КПП) и технологической подготовки производства (ТПП). Именно после КПП и ТПП должно быть однозначно определено участие КИМ в процессе производства. Выделяется несколько источников документации, сгруппированных в табл. 1.1.

Виды документации, используемые в ЖЦИ

Источник документации и данных	Типы документов и данных
Конструкторы	Чертеж, трехмерная модель
Технологи	Технологический процесс, трехмерные модели операционных заготовок
Лаборатория КИМ	Программа измерения, протокол измерения

С точки зрения представления информации в большинстве случаев возможны два варианта: бумажный и цифровой вид. Бумажный вид традиционен и его применение допустимо для большинства типов данных. Однако такой способ хранения имеет ряд недостатков, различающихся в зависимости от типа данных. Поэтому целесообразно в первую очередь рассматривать именно цифровой вид представления

В таком случае чертежи и трехмерные модели должны храниться в системе управления данными с целью предоставления по запросу всем участникам процесса разработки и производства детали. Также аналогичный доступ должен быть для технологического процесса. Разница заключается лишь в том, что трехмерная модель и чертеж являются типовой информацией (которая может создаваться различными САД-системами без собственной базы данных), представляющей с использованием PDM-системы [2], а технологический процесс формируется с использованием специализированной системы (например, САПР ТП «Вертикаль»), которая играет роль хранилища [3].

Для представления информации, в зависимости от типа данных, могут использоваться различные средства. Можно выделить несколько типов и средств представления информации (табл. 1.2). Здесь средства с меньшим номером соответствуют большей сложности в работе с данными, так как обладают рядом дополнительных условий.

1.2 Контроль микрогеометрии поверхности и ее влияние на функциональные свойства деталей приборов

Одним из основных показателей качества изделий приборостроения является их надежность, которая в значительной мере определяется эксплуатационными свойствами деталей и соединений: износостойкостью, усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, герметичностью соединений, прочностью посадок и др.

Типы и средства представления информации

Используемые средства для просмотра	Описание	Типы данных
Специализированные средства представления	Использование дополнительного программного обеспечения, позволяющего работать с узкоспециализированными типами данных. Такие системы могут быть установлены только у соответствующих специалистов. Требуют дополнительного изучения.	Трехмерные модели САД систем, тех-процесс в системах САПР ТП, программы измерения КИМ
Дополнительные бесплатные программы	Данные программы требуют установки и изучения, хотя и в меньшей степени. Могут использоваться всеми без исключения.	Трехмерные модели в формате STEP
Стандартные программы	Не требуют изучения и применяются для данных, доступных широкому кругу пользователей. При этом необходима установка и загрузка данных, что усложняет и замедляет использование.	Текстовые файлы и документы в формате PDF
Интеграция PDM-системы со средствами просмотра	Требует внешние системы для просмотра, но за счет интеграции автоматически передает им данные, что избавляет пользователя от дополнительных действий и ускоряет работу.	Различные виды интеграции в зависимости от PDM системы и типов данных
Встроенные в PDM-систему просмотрщики	Просмотр данных любым пользователем прямо в PDM-системе.	Текстовые файлы, PDF-файлы и трехмерные модели

Все эти эксплуатационные свойства зависят от материала детали, точности размеров, качества рабочих поверхностей, в частности шероховатости. Как правило, все разрушения деталей начинаются с поверхности. Таким образом, техническое решение проблемы повышения качества приборов в значительной мере обусловлено возможностью обеспечения необходимой шероховатости поверхности деталей [4].

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхностного слоя деталей. В условиях эксплуатации внешним воздействиям в первую очередь подвергаются поверхности деталей приборов. Износ трущихся поверхностей, зарождение трещин, смятие, коррозионное разрушение и др. – это процессы, протека-

ющие на поверхности деталей и в некотором прилегающем к поверхности слое. Естественно, что придание поверхностям деталей специальных свойств, способствует существенному повышению показателей качества, как деталей, так и приборов в целом.

От шероховатости поверхности зависит прочность деталей. Разрушение деталей можно объяснить концентрацией напряжений вследствие наличия неровностей. Отделочная обработка деталей (накатывание, полирование и т. п.) обеспечивает значительное повышение их прочности.

Уменьшение шероховатости поверхности значительно улучшает антикоррозионную стойкость деталей. Качество поверхностного слоя играет важную роль в сопряжениях, отвечающих условиям герметичности и теплопроводности.

Малая шероховатость поверхности бывает необходима и для придания красивого внешнего вида детали или удобства содержания поверхностей в чистоте.

Требования к шероховатости должны устанавливаться из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделия. Если в этом нет необходимости, то требования к шероховатости поверхности не устанавливаются, и шероховатость этой поверхности контролироваться не должна.

1.2.1 Способы контроля параметров шероховатости

Контроль шероховатости поверхности может проводиться:

1. сравнением поверхности изделия с образцами шероховатости;
2. определением параметров шероховатости поверхности с помощью контактных приборов
3. определением параметров шероховатости поверхности с помощью бесконтактных приборов;
4. измерением шероховатости с помощью слепков;
5. измерением шероховатости с одновременным управлением ее параметрами в процессе механической обработки.

Сравнение с образцами

Образец шероховатости поверхности – образец поверхности с известными параметрами шероховатости, полученной определенным способом обработки.

Сравнение поверхностей изделий, полученных обработкой резанием, полированием, электроэрозионной, дробеструйной и пескоструйной, с образцами шероховатости поверхности (рис. 1.16) производится по ГОСТ 9378-93 (ИСО 2631-1, ИСО 2632-2) [5].

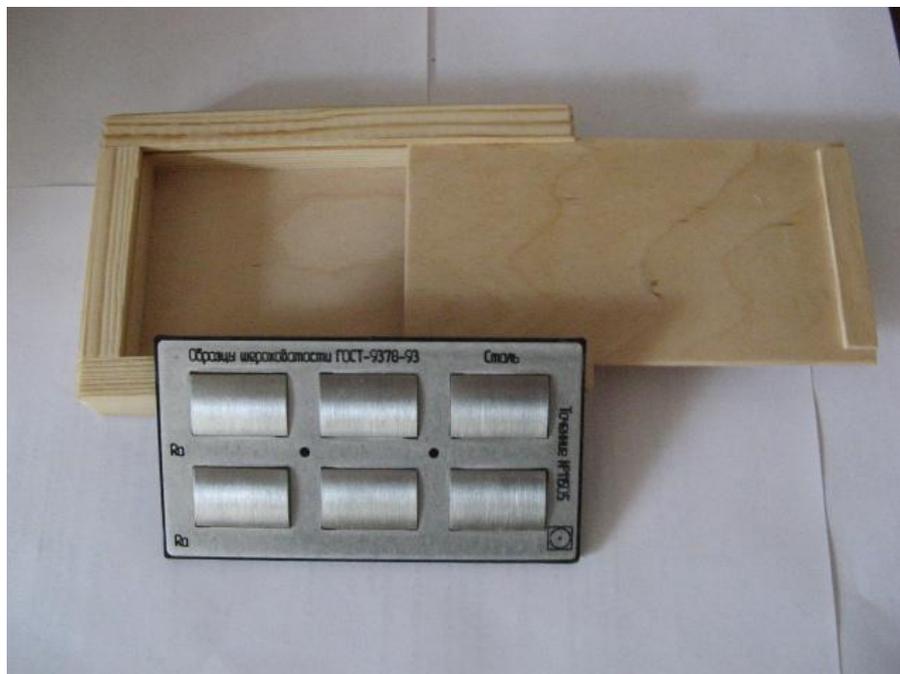


Рис. 1.16. Образцы шероховатости

Вместо образцов шероховатости могут применяться аттестованные образцовые детали. Контролируемая поверхность сравнивается с образцом визуально и на ощупь. Поверхности сравнивают невооруженным глазом, с помощью увеличительной лупы, сравнительным микроскопом, специальными средствами осмотра внутренних поверхностей, комбинацией перечисленных способов с ощупыванием поверхностей пальцем, тонкой металлической или пластмассовой пластиной и т. п.

Наиболее точно оцениваются поверхности деталей из материала аналогичного образцу и изготовленных тем же, что и образец, способом.

В условном обозначении образца (или наборов образцов) шероховатости указывают: номинальное значение (или интервал значений для набора) параметра шероховатости R_a , условное обозначение способа обработки, стандарт.

Примеры:

Образец шероховатости 1,6 ШЧ ГОСТ 9378-93

Набор образцов шероховатости 0,2-0,8 ШЦВ ГОСТ 9378-93, где

1,6 и 0,2–0,8 – значения параметра шероховатости R_a ;

ШЧ – шлифование чашеобразным кругом;

ШЦВ – шлифование периферией круга, форма образца цилиндрическая вогнутая.

Образцы шероховатости должны иметь одинаковый цвет и блеск на всей рабочей поверхности. Перед проведением контроля образцы должны быть размагничены. Основное направление неровностей должно быть параллельно более короткой стороне образца.

Основные области применения способа визуального сравнения изделия с образцом: контроль шероховатости труднодоступных поверхностей, оперативная оценка шероховатости детали на различных стадиях технологического процесса механической обработки, контроль неотчетливых рабочих поверхностей деталей, а также предварительная оценка шероховатости поверхности. Для поверхностей с малыми высотами неровностей ($R_a \leq 1,6$ мкм) должна быть предусмотрена выборочная проверка (измерение) на приборах.

Измерение параметров контактными приборами (стационарными и портативными)

Измерение параметров шероховатости контактными приборами осуществляется непосредственно по шкалам приборов – профилометров или по записанной профилограмме сечения, полученной на профилографах.

Работа контактных приборов основана на принципе «ощупывания» измеряемой поверхности алмазной иглой, имеющей радиус 2–10 мкм. Вертикальные и горизонтальные перемещения иглы, вызываемые поверхностными неровностями, преобразуются в электрические сигналы при помощи индуктивных, емкостных, пьезоэлектрических и других преобразователей и регистрируются на шкале прибора или записываются в виде профилограммы.

Принцип работы профилометра (рис. 1.17) следующий: сигнал поступает от датчика 4, соединенного с алмазной иглой, перемещающейся перпендикулярно контролируемой поверхности 5, на электронный усилитель 2, в котором сигнал интегрируется для выдачи усредненного параметра, количественно характеризующего поверхностные неровности на определенной длине.

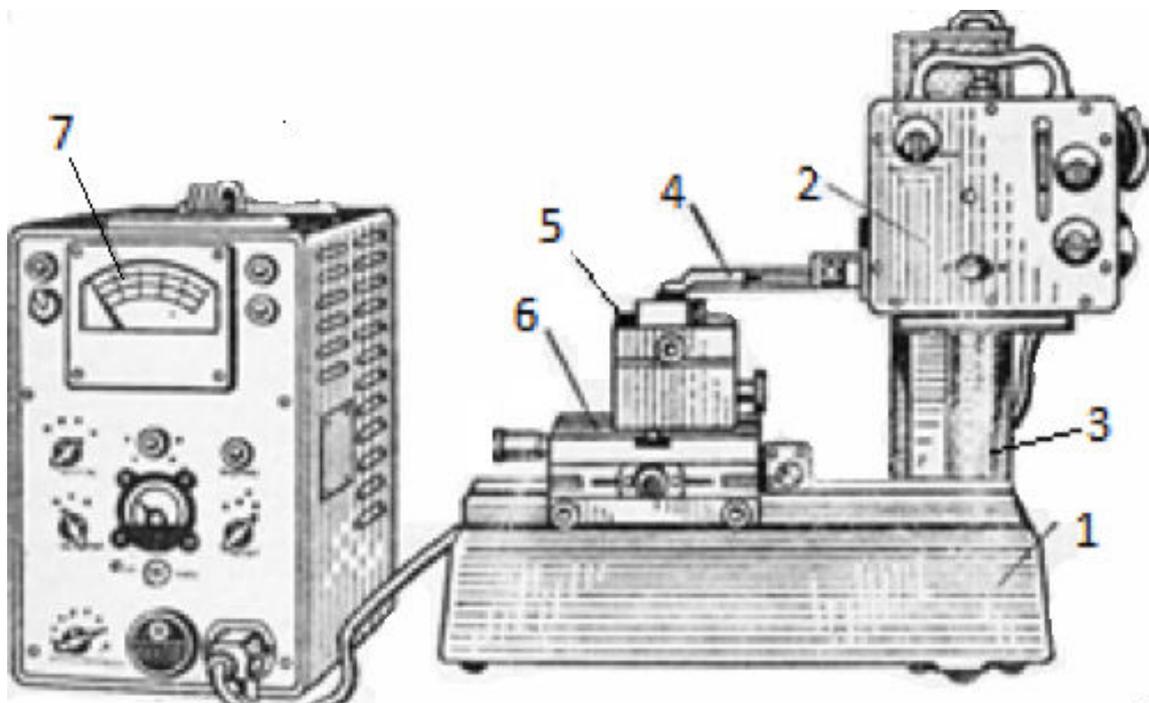


Рис. 1.17. Профилометр фирмы «Калибр»

После завершения ощупывания ведется отсчет показаний по шкале прибора 7. Заготовка устанавливается на подставке 6, которая имеет возможность перемещаться поперек основания 1. Положение алмазной иглы регулируется перемещением электронного усилителя 2, с которым она непосредственно соединена вдоль стойки 3.

Приборы для контроля шероховатости поверхности могут выполнять функции как профилометров, так и профилографов. Результаты измерения можно сохранить в электронном виде. Функцию алмазной иглы выполняют измерительные щупы (датчики). Для выполнения разнообразных измерений приборы снабжаются множеством датчиков и насадок.

Например, лабораторный прибор Hommel tester T8000 (рис. 1.18) предназначен для определения всех параметров шероховатости по действующим в настоящее время нормам и расчетам специальных параметров. Имеется возможность контроля микро- и макронеровностей профилей, а также определения топографий поверхности.

Для измерения и обработки параметров шероховатости непосредственно на оборудовании, производящем обработку той или иной заготовки, могут служить современные переносные приборы для измерения шероховатости поверхностей. Например, профилометр «Абрис-ПМ7» (рис. 1.19) и др., такие приборы имеют небольшой объем и малую массу, что позволяет их легко транспортировать с одного оборудования на другое, расположенного на разных участках предприятия.

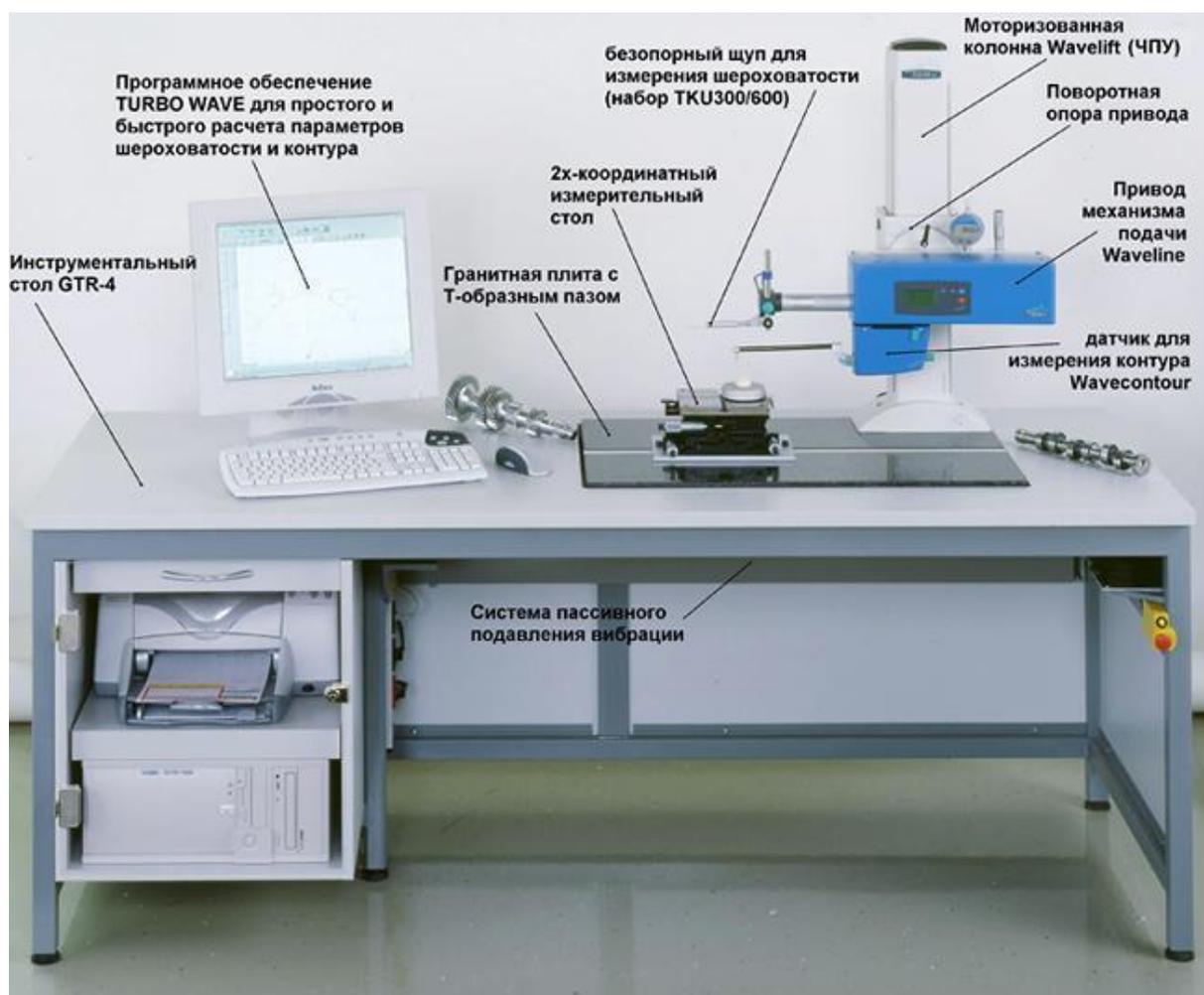


Рис. 1.18. Лабораторный профилометр-профилограф фирмы «Теса» модель Hommel tester T8000



Рис. 1.19. Профилометр «Абрис-ПМ7»

Определение параметров шероховатости поверхности с помощью бесконтактных приборов

Определение параметров шероховатости поверхности с помощью бесконтактных приборов производится в основном оптическими приборами, действие которых основано на принципах светового свечения, теневого свечения, интерференции света и применения растворов. Например, с помощью микроскопов МИС-11, ОРМ-1, ПТС-1 и микроинтерферометров МИИ-4, МИИ-5, МИИ-9, МИИ-10, МИИ-12 измеряют следующие параметры шероховатости поверхности: R_z , R_{max} , S , S_m [6].

Проводить бесконтактные исследования увеличенной реальной картины микрорельефа поверхности позволяет профилометро-профилограф со встроенными оптическими приборами.

Принцип его действия заключается в том, что микроскоп увеличивает трехмерную интерференционную картину поверхности, которая копируется в виде голографического изображения микрорельефа этой поверхности, а затем, с использованием сканирующего индикатора электромагнитного поля, замеряются необходимые параметры шероховатости уже увеличенной реальной картины микрорельефа.

Технический результат: увеличение точности размеров, увеличение числа трасс ощупывания, снижение оперативного времени регистрации, возможность исследования реальной картины микрорельефа.

Приборы бесконтактного контроля шероховатости применяются также для оперативного межоперационного контроля шероховатости деталей непосредственно в производственных условиях. Например, переносной прибор «Дозор-КТ» (рис. 1.20), предназначенный для контроля шероховатости наружных поверхностей светоотражающих объектов, и «Дозор-В», предназначенный для контроля шероховатости внутренних поверхностей светоотражающих объектов.

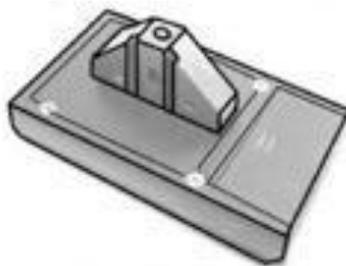


Рис. 1.20. Прибор «Дозор-КТ» для бесконтактного контроля шероховатости

Работа приборов основана на связи формы индикатрисы рассеяния с характеристиками шероховатости отражающей поверхности. Настройка производится по образцовым деталям. Прибор легко перенастраивается на любую шероховатость поверхности в заданном диапазоне. На результат не влияют материал и цвет контролируемой детали, а также её пространственное положение.

Широкими возможностями по измерению параметров шероховатости в различных системах обладает профилометр модели MarSurf PS1 фирмы «Mahr» (рис. 1.21). Прибор имеет встроенный аккумулятор и внутреннюю память, в которой можно хранить до 15 профилей и 20000 результатов измерения шероховатости. В связи с этим данный тип приборов наиболее востребован при контроле шероховатости в рабочих условиях, а встроенный интерфейс прибора позволяет соединить его с ПК и использовать внешний принтер для печати профилограмм.



Рис. 1.21. Профилометр модели MarSurf PS1

Измерение шероховатости поверхности с помощью слепков

Этот способ применяется при контроле параметров шероховатости труднодоступных поверхностей: отверстий малых диаметров, пазов, канавок, поднутрений, труднодоступных элементов крупногабаритных изделий, а также поверхностей сложной формы: кулачков, вогнутых сферических поверхностей, зубчатых колес, резьбы изделий и т. д. в процессе обработки, эксплуатации и ремонта.

Вначале изготавливается слепок с измеряемой поверхности, а затем по размерам параметров шероховатости слепка определяют параметры шероховатости самой поверхности.

Для снятия слепка используют различные материалы:

1. масляно-гуттаперчевую массу;
2. восковые сплавы;
3. полимерно-композиционные оттисочно-слепочные материалы.

Шероховатость поверхности слепка можно измерять с помощью оптических или ощупывающих приборов, приведенных ранее.

При невозможности измерения шероховатости непосредственно или с помощью слепков допускается разрушение детали. Если разрушение детали экономически нецелесообразно, то параметры шероховатости измеряют на упрощенных образцах-свидетелях, полученных путем имитирования контролируемой технологической операции.

Контроль шероховатости с одновременным управлением ее параметрами в процессе механической обработки

Измерение параметров шероховатости и управление этими параметрами в процессе обработки позволяют автоматизировать процесс контроля и обеспечить требуемые параметры шероховатости деталей машин на стадии изготовления. Такой контроль на отделочных операциях является перспективным направлением повышения качества выпускаемой продукции [7].

1.2.2 Непараметрический подход к оценке и контролю микрогеометрии поверхности деталей приборов

Основные фундаментальные исследования в области изучения влияния микрогеометрии поверхности на конкретные эксплуатационные свойства представлены в работах И. В. Крагельского, А. А. Маталина, Н. Б. Демкина, Э. В. Рыжова, В. С. Комбалова, Я. А. Рудзита, Ю. Г. Шнейдера, В. А. Валетова, В. М. Мусалимова, К. Н. Войнова. Из зарубежных ученых следует отметить исследования Ж. А. Гринвуда (Greenwood J. A.), Ж. Б. П. Вильямсона (Williamson J. B. P), Д. Ж. Уайтхауза (Whitehouse D. J.) и Ж. Ф. Арчарда (Archard J. F.). Однако во всех рассматриваемых исследованиях для описания микрогеометрии поверхности используются параметры или производные от них комплексные показатели, которые определяют лишь отдельные усреднённые характеристики шероховатости поверхности, что не позволяет точно определить реальную шероховатость.

Наиболее распространенные математические модели, обеспечивающие полное описание профиля поверхности (модель Наяка, автокорреля-

ционная модель, упрощенная классическая модель и др.), принято считать адекватными, если параметры профиля, воспроизведенного с помощью выбранной модели и аналогичные параметры реального профиля, полученные с помощью приемлемого измерительного прибора, будут одинаковыми или будут отличаться на пренебрежимо малую величину.

Микрогеометрию случайных нормально распределенных поверхностей в общем случае можно описать с помощью трех базовых критериев, а в частном случае – с помощью двух. Однако среди реальных поверхностей многие нельзя считать чисто случайными, а последние не всегда являются нормально распределенными. С достаточной для практики точностью нормально распределенными можно считать электроэродированные поверхности. При других видах финишной обработки отклонения от нормального закона распределения могут быть значительными.

Таким образом, использование моделей, достоверно описывающих случайные нормально распределенные поверхности, имеет определенные ограничения. Кроме того, использование стандартных критериев оценки шероховатости поверхности не обеспечивают их полного описания. Поэтому трудно решить проблему достоверного описания геометрии профиля поверхностей и с помощью различных, так называемых комплексных критериев, представляющих всевозможные комбинации из таких малоинформативных параметров, обобщить результаты исследований.

В качестве альтернативного метода параметрическому описанию профиля интересен непараметрический подход к описанию и контролю микрогеометрии поверхности, предложенный В. А. Валетовым. Данный метод базируется на использовании графических изображений различных функций.

На основе непараметрического подхода описания микрогеометрии была разработана методика практического использования непараметрических критериев для оптимизации микрогеометрии поверхности. Основной целью данной методики является поиск рациональной микрогеометрии функциональных поверхностей, свойства которых зависят от нее [8].

В качестве критериев оценки используются графические изображения функций плотности распределения ординат или углов наклона профилей, а ещё лучше – образы самих профилей или микротопографий поверхностей. Главное достоинство данных критериев в их информативности.

Любой стандартный параметр шероховатости содержит недостаточное количество информации для полного описания микрогеометрии, и, будучи реализованным, практически никак не предопределяет структуру микрорелье-

ефа. Таким образом, для заданного на чертеже параметра можно получить бесчисленное множество разных микрорельефов поверхности свойства, которые будут разными и чаще всего не такими, как ожидалось.

Известно, что функция плотности распределения ординат или тангенсов углов наклона профиля содержит не менее 95 % информации о профиле, т. е. каждой заданной функции соответствует практически только один микрорельеф. Возможное рассеяние микрорельефов для одной заданной функции пренебрежимо мало и не может привести к большому отклонению ожидаемого функционального свойства.

Исследование влияния исходной микрогеометрии на конкретное функциональное свойство поверхности проходит в два этапа. На первом этапе изготавливаются три одинаковых образца, отличающиеся только исходной шероховатостью функциональной поверхности, причем один образец изготавливается с максимально чистой поверхностью (низкой шероховатостью), второй с максимально грубой (высокой шероховатостью) и третий с промежуточным значением шероховатости поверхности между чистой и грубой.

После этого образцы подвергаются испытаниям на конкретное функциональное свойство. По результатам испытания будет выявлено наличие или отсутствие влияния исходной шероховатости на конкретное функциональное свойство. В первом случае исследование переходит на второй этап, а во втором случае признается, что микрогеометрия поверхности не влияет на изменение данного функционального свойства.

Для проведения исследования на втором этапе изготавливается максимально возможное количество испытуемых образцов, отличающихся только исходным микрорельефом. Это означает, что изготавливаются образцы одинаковых размеров и формы, желательны стандартных, из одной и той же партии конструкционного материала, обладающего практически одинаковыми химическими, физическими, механическими и технологическими свойствами. Для создания разного исходного микрорельефа на каждом образце используются разные методы и режимы обработки. Для исключения влияния побочных факторов, например, влияния разной степени наклепа, все образцы после создания на них разного исходного микрорельефа подвергаются термообработке для снятия остаточных напряжений.

Для повышения достоверности эксперимента, для каждого варианта исходного микрорельефа целесообразно изготовить несколько одинаковых образцов. С помощью профилометра с функциональных поверхностей каж-

дого образца фиксируются профили равной длины. В результате статистической обработки данных о профиле получаем графические изображения опорных кривых, плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля и микротопографию поверхности. Благодаря применению современных приборов вся эта процедура длится несколько секунд, а её результаты могут автоматически сохраняться в базу данных предприятия.

Все изготовленные вышеуказанным способом образцы подвергаются одинаковому функциональному воздействию, с контролем величины характеристик этого функционального свойства. По результатам исследования определяется образец с лучшим уровнем рассматриваемого функционального свойства. Графическое выражение кривой Аббота или график плотности распределения соответствующей функции, либо сам профиль поверхности образца, у которого зафиксирован лучший результат, принимается в качестве эталона, а технология изготовления этого образца нормируется в технологическом процессе изготовления детали на производстве.

При контроле конкретной поверхности необходимо наложить шаблон, изображенный на прозрачном материале (например, оргстекле) или на дисплее, на графическое изображение функции контролируемой поверхности. Если изображение функции контролируемой поверхности оказывается в пределах шаблона, то ее функциональное качество, зависящее от микрогеометрии, гарантировано. При выходе непараметрического критерия контролируемой микрогеометрии за пределы шаблона изделие следует браковать по требованиям к шероховатости поверхности. Для не ответственных изделий целесообразно использовать менее информативные, но более простые в графическом изображении опорные кривые профиля (кривые Аббота) или функции распределения ординат и углов наклона профиля. Для изделий с жесткими эксплуатационными характеристиками, существенно зависящими от микрогеометрии функциональных поверхностей, в качестве непараметрических критериев следует использовать графики функций плотности распределения ординат или углов наклона профиля, а еще лучше – графические изображения самого профиля или микротопографии поверхности.

В последнем случае мы возвращаемся к эталонам шероховатости, но процесс сравнения с эталоном поручаем не человеческому глазу, а компьютеру, что весьма существенно, т. к. исключает субъективизм в оценке. При использовании любых графических изображений в качестве непараметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии не существует

технических трудностей для автоматизации процесса контроля. Таким образом, практическое применение предлагаемого метода такое же простое, как использование предельных калибров при контроле размеров деталей.

При изготовлении образцов для испытаний виды и режимы их обработки должны быть зафиксированы. Определив в результате эксперимента наилучший из возможных микрорельефов для данного функционального свойства поверхности, автоматически выводятся технологические методы его воспроизведения.

База данных по установлению рациональной микрогеометрии и технологических методов ее обеспечения со временем может настолько наполниться, что не потребуются проведение специальных экспериментов, а можно будет воспользоваться уже имеющимися в базе данных сведениями. Однако следует отметить, что вид рациональной микрогеометрии напрямую зависит от метода ее получения, а, следовательно, найденная на одном предприятии микрогеометрия, отвечающая наилучшим требованиям по заданному функциональному свойству, не во всех случаях сможет быть воспроизведена на других производствах. Это связано с тем, что каждое предприятие имеет различный парк оборудования и методы обработки. В таких случаях необходимо будет проводить испытания повторно для каждого конкретного производства.

Для нормирования рациональной микрогеометрии необходимо каждому такому функциональному свойству присвоить постоянный номер. Этот номер следует проставлять на знаке шероховатости, форма которого не имеет принципиального значения. Таким образом, вместо нормирования не отражающих функциональных свойств поверхностей параметров следует нормировать конкретное функциональное свойство поверхности.

1.2.3 Влияние микрогеометрии поверхности на эксплуатационные свойства деталей

Установление количественных и качественных взаимосвязей между микрогеометрией поверхности и ее конкретным эксплуатационным свойством имеет теоретическое и практическое значение. Доказано, что на двадцатка функциональных свойств поверхности, таких как износостойкость, коррозионная стойкость, отражаемость световых лучей, теплоотражаемость, электрическая прочность, контактная жесткость, пылеудаляемость и др., существенно влияет ее микрогеометрия, поэтому одной из основных

задач является обеспечение оптимизации ее для конкретных функциональных свойств в конкретных условиях эксплуатации.

Современное приборо- и машиностроение характеризуется сложными условиями эксплуатации, связанными с высоким уровнем действующих напряжений, вибрациями, широким температурным интервалом, агрессивными средами и т. п. Поэтому необходимо соблюдение особых требований к качеству поверхностей для обеспечения надежности и долговечности деталей. По статистике большинство приборов и машин (85-90 %) выходят из строя в результате износа поверхностей отдельных деталей, а затраты на ремонт и техническое обслуживание изделий в несколько раз превышают их стоимость.

Создание приборов и машин, не требующих капитальных ремонтов, позволяет сэкономить огромное количество финансовых средств, трудовых ресурсов, материалов. Актуальность проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей объясняется ещё и тем, что возможности повышения качества изделий в результате увеличения геометрической точности изделий практически исчерпаны и связаны со значительным увеличением затрат. Поэтому не удивительно, что именно на создание оптимального микрорельефа поверхностей деталей в процессе повышения их качества и делают ставку ведущие приборостроительные и машиностроительные корпорации мира [9].

Влияние микрогеометрии поверхности на процессы трения

Многие исследователи считают, что основным фактором, влияющим на характер изменения микрогеометрии поверхности при ее трении, является стремление микрогеометрии поверхности к некоторому стабильному значению. Отмечается тот факт, что исходная шероховатая поверхность будет выглаживаться, а исходная гладкая становится шероховатой. При одинаковых внешних условиях трения материалов после приработки в течение нескольких часов обе шероховатости делаются одинаковыми, принимая характер так называемой «равновесной» шероховатости. Это открытие сделал профессор И. В. Крагельский на основании неизменности шероховатости по параметрам R_a и R_z .

Гипотеза о «равновесной» шероховатости получила широкое распространение среди ученых, изучающих процессы трения. Выводы, полученные на основе этой гипотезы, послужили основой для практических рекомендаций по оптимизации микрогеометрии поверхностей трения, но в большинстве случаев оказывались бесполезны на практике. Это объясня-

ется малой информативностью критериев оценки микрогеометрии поверхности, которые применялись в исследованиях. Так в большинстве исследований «равновесной» шероховатости для оценки применялся лишь один параметрический критерий R_a или R_z .

Непараметрический подход к оценке микрогеометрии поверхности выводит исследования по оптимизации микрорельефа поверхностей трения-скольжения на новый уровень. При помощи функций плотностей распределения ординат профиля и углов его наклона исследования по выявлению характера изменения микрорельефа функциональных поверхностей обретают более совершенное метрологическое обоснование. Таким образом, появляется возможность более достоверной проверки некоторых выводов и рекомендаций по оптимизации микрогеометрии поверхностей трения, которые были сделаны ранее на основе неинформативных параметрических критериев.

Для исследования изменения микрорельефа поверхностей в процессе их трения-скольжения была разработана программа эксперимента, которая включала следующие основные этапы: изготовление опытных образцов с различной исходной микрогеометрией поверхности; оценка исходной микрогеометрии поверхностей; испытания на машине трения; оценка изменений микрогеометрии после каждого цикла трения; анализ полученных результатов.

Полученные результаты показали, что непараметрические критерии оценки микрогеометрии, плотности распределения ординат профиля поверхности и тангенсов углов наклона профиля изменяются, что свидетельствует о постоянной смене характера микрогеометрии поверхности образцов в процессе их трения.

Использование более информативных критериев оценки микрогеометрии поверхностей трения скольжения позволило установить, что в парах трения при их приработке «равновесная шероховатость» не возникает. Что особенно важно, наблюдается циклическое изменение характера микрогеометрии поверхности образцов в процессе их трения. Первоначальный острровершинный микрорельеф постепенно разрушаясь, превращается в платообразный. В процессе работы пары трения изнашиваются, происходящие микровырывы снова превращают микрорельеф поверхности в остроконечный.

Влияние микрогеометрии поверхности на сохранение смазочного материала на поверхностях деталей приборов

Одним из важных условий долговечной и безопасной эксплуатации пар трения является использование качественных консистентных и пластичных смазочных материалов, однако возникает проблема обеспечения постоянного присутствия смазочного материала в узлах трения.

Недостаточное количество смазки вызывает повышение температуры в области контакта, приводит к износу подвижных сопряжений, увеличению кинематических погрешностей, повышению динамических нагрузок, снижению КПД и долговечности узла трения в целом.

Использование известных технологий смазывания не всегда приводит к надежной эксплуатации пар трения, это происходит из-за того что смазочный материал быстро выдавливается из зоны трения, оставляя пары трения работать практически без смазки, вследствие чего происходит резкое повышение износа.

Обеспечение постоянного присутствия смазочного материала в зоне трения деталей приборов и машин позволит сократить простои из-за преждевременных замен или ремонта пар трения, а также повысить их надежность.

Как показал анализ приборов для контроля консистентных и пластичных смазок, не существует эффективных и простых методов определения влияния микрогеометрии поверхности на удержание смазочных материалов. В связи с этим была разработана методика и использован прибор «адгезиметр универсальный», позволяющий осуществлять этот контроль по критерию скорости вращения деталей/образцов путем сравнения момента начала и окончания отрыва смазки, которые бы обеспечивали и гарантировали долговременное сохранение смазки в зоне контакта подвижных сопряжений.

Прибор (рис. 1.22) содержит высокооборотный электрический двигатель 1, скорость вращения выходного вала которого фиксируется датчиком Холла 2 и может плавно регулироваться в широких пределах. Выходной вал через муфту 3 соединен с пустотелым цилиндрическим образцом 4. На наружную поверхность образца, который находится внутри стакана 7, наносится определенное количество смазочного материала. Сверху стакан закрыт крышкой 8, чтобы смазочный материал не вылетал из зоны вращения образца. Стакан с крышкой установлен на точных электронных весах 5. Нагрев образца осуществляется регулятором 9. Для охлаждения си-

стемы установлен вентилятор 10. Все части прибора, кроме двигателя, находятся в корпусе конструкции б.

При определенной частоте вращения смазочный материал начинает отрываться от поверхности образца за счет центробежной силы и попадать на внутренние стенки стакана, увеличивая его исходную массу. Таким образом, электронными весами фиксируется момент, когда даже первая частица смазочного материала оказывается на стенках стакана. Наблюдение прекращается при выявлении момента, когда масса стакана стабилизируется. При этом устанавливаются как начальное значение скорости вращения, при которой произошел отрыв части смазочного материала, так и предельное, когда вся смазка отлетит с поверхности вращающегося образца.

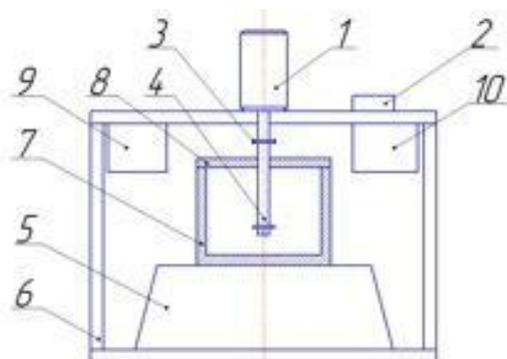


Рис. 1.22 Схема прибора «Адгезиметр»

Таким образом, определяется влияние исходной микрогеометрии образца на интегральный показатель смазочного материала, характеризующий предел применимости по критерию скорости вращения деталей/образцов. По этому показателю с помощью прибора также возможно определить эксплуатационные показатели и выявить, что какая-то смазка является бракованной или фальсифицированной.

ГЛАВА 2

МАЛЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

2.1 Основные понятия и определения МИП

Под новаторским предприятием понимается такое предприятие, которое активно используют в своей деятельности нововведения в области продукции или услуг, позволяющие удовлетворять появляющиеся потребности и создавать новые рынки.

Малые инновационные предприятия (МИП) являются одним из видов структуры новаторского типа, которая получила название стартап (англ. *start-up*). Особенностью такого предприятия является нацеленность на производство конкретной продукции.

Из-за новизны такого вида структур пока не сформировалось однозначное представление о том, что такое малое инновационное предприятие, и оно определяется как предприятие, разрабатывающее и внедряющее в производство наукоемкие технологии и изделия. Такое определение является слишком общим и не затрагивает ключевые особенности. Более конкретно МИП описывает следующее определение: малое инновационное предприятие – это объединение специалистов, имеющих определенные знания, а также аппаратные и программные ресурсы для решения задач подготовки производства или непосредственного производства продукции.

Хотя в такой формулировке МИП и не описывается абсолютно конкретно с отсечением других схожих структур, также базирующихся на понятии стартап, но уже включает ряд характерных особенностей такого предприятия. Более точное определение можно дать только в рамках решаемых им задач. С этой точки зрения можно выделить два типа МИП:

- Инжиниринговые центры.
- Малые производства.

Инжиниринговые центры представляют собой организации, которые выполняют инжиниринговые услуги, то есть комплекс коммерческих услуг по подготовке и обеспечению процесса производства и реализации продукции, а также по обслуживанию и эксплуатации промышленных, инфраструктурных и других объектов. Формирование инжиниринговых центров производится на базе тех ресурсов, которые не задействованы в производственном процессе, задействованы не полностью или не предназначены для производства продукции. Таким образом, инжиниринговые центры формируются на базе предприятий или учебных заведений с подготовленной базой современного оборудования. В таком виде МИП специализируется на предоставлении услуг в соответствии с имеющимися у него компетенциями.

Другим подходом является использование схемы MiP (англ. *Mini Production* – малое производство), соответствующей типу «Малое производство», когда основной целью МИП является выпуск продукции, которая может быть использована как конечным пользователем, так и другими предприятиями при производстве своей продукции. Для MiP на текущем этапе развития характерна некоторая спонтанность организации без единых принципов развития, свойственных всем представителям этого направления. Однако можно выделить ряд критериев, позволяющих называть такие компании предприятиями, и характеризующие их как перспективные и стабильные за счет проработанной стратегии развития.

Принципы «Малого производства»:

- Унификация.
- Стандартизация.
- Масштабируемость.
- Структурные упрощения.
- Базирование на знаниях.
- Открытость.

Принцип унификации определяет как наличие в структуре предприятия определенных способов взаимодействия между подразделениями или отдельными участниками, так и использование универсального оборудования. Проблема обеспечения универсальности используемого оборудования традиционна, так как для единичного производства характерен высокий коэффициент закрепления операции за каждым рабочим местом.

С другой стороны обеспечение корректности и полноты передачи данных между участниками процесса проектирования является относительно новой проблемой, которая, тем не менее, может сильно осложнить процесс выпуска новой продукции и, зачастую, становится «камнем преткновения» при попытках увеличить эффективность на предприятиях со стажем работы в десятки лет.

Следование принципу стандартизации также позволяет обеспечить качественную внутреннюю коммуникацию на предприятии. Можно выделить 4 вида стандартизации:

1. Стандартизация архитектуры оборудования.
2. Стандартизация протоколов связи при использовании оборудования.
3. Стандартизация информационного обмена между программным обеспечением.
4. Стандартизация процедур развития МИП.

Отдельно выделяется «динамическая» стандартизация, подразумевающая необходимость отказа от используемых на предприятии стандартов при выполнении следующих условий:

- Существование стандартов с лучшими показателями эффективности использования, которые потенциально могут заменить существующие.
- Отсутствие достаточного обоснования на сохранение существующих стандартов.
- Наличие требуемой документации для принятия и внедрения нового стандарта.

В отличие от традиционных предприятий, на которых также возможны смены используемых стандартов, для МИП такая процедура должна быть существенно упрощена с целью следования новаторской политике и соответствия статусу «инновационный».

Под стандартизацией архитектуры оборудования подразумевается, в первую очередь, создание оборудования на основе стандартных компонентов, что упрощает модификацию или ремонт. Это важно для обеспечения и поддержания достаточной унификации используемых средств и снижения издержек.

Стандартизация протоколов связи с оборудованием важна для его отладки и изучения принципов работы с целью совершенствования и максимально полного использования всех возможностей.

Проблема обеспечения информационной совместимости используемого программного обеспечения стоит очень остро, так как практически идентичные (для рядового пользователя) данные могут храниться в форматах-контейнерах без взаимной совместимости, что усложняет коммуникацию не только вне предприятия, но и внутри него. Таким образом, за счет обеспечения стандартизации информационного обмена можно существенно повысить эффективность работы предприятия.

МИП, ориентированное на производство, в своем развитии должно быть направлено на построение предприятия в традиционном понимании. В связи с этим можно выделить ряд целей и стратегий развития, которые позволят развивать такие предприятия в правильном направлении. Стандартизация принципов развития позволит не акцентировать на них внимание и производить продукцию с максимальной эффективностью. Такой подход хорошо коррелирует с другими принципами построения – «Масштабируемостью» и «Структурными упрощениями».

Принцип масштабируемости подразумевает такой подход к развитию, когда происходит наращивание уже существующих возможностей предприятия за счет их расширения и углубления. Основа предприятия в соответствии с принципом структурных упрощений имеет множество атрибутов, характерных для крупных предприятий, но большинство из них находится в зачаточном состоянии, что позволяет активировать и развивать их на определенном этапе масштабирования предприятия.

Принцип базирования на знаниях отражает в себе основы формирования МИП, так как за счет «компактности» предприятия большую роль играют знания специалистов, и состав МИП подбирается в соответствии с наличием у них тех или иных компетенций. Аналогично идет и развитие за счет появления дополнительных знаний у сотрудников предприятия или привлечения новых специалистов. В таких случаях оборудование отходит на второй план и его приобретение без наличия на предприятии специалиста, который будет на нем работать (что характерно для некоторых крупных предприятий), становится маловероятным.

Принцип открытости является не основным, а вспомогательным, но следование ему позволяет обеспечить выполнение других принципов и сделать предприятие эффективным и конкурентоспособным. Под открытостью здесь понимается использование для открытых технологий, которые во всем мире представляются направлением Open Source.

Большая часть программного и аппаратного обеспечения под эгидой Open Source ограничено в сравнении с коммерческими продуктами, что критично для крупных предприятий, но не столь важно для МИП. Данное тип программного обеспечения требует существенно меньше затрат по сравнению с коммерческими продуктами (в большинстве случаев для программного обеспечения затраты вообще не требуются за исключением издержек на обучение и внедрение), что не всегда критично для крупных предприятий, но играет ключевую роль на этапе создания и развития МИП.

2.2 Применение систем с открытым исходным кодом для информационной поддержки жизненного цикла изделия

Введенный в конце 90-х термин Open Source определял такой вид программного обеспечения, дистрибуция которого осуществляется вместе с исходным кодом, а лицензия на его использование соответствует ряду требований, определенных организацией «Open Source Initiative». С тех пор термин приобрел более широкое значение и может включать, в том числе, аппаратное обеспечение и даже целые механизмы и машины. Так,



на протяжении нескольких лет активно развивается проект Open Source Ecology [goo.gl/LBS20N] направленный на разработку сельхозхозяйственных машин и оборудования с последующим подробным описанием процесса производства и сборки. В соответствии с подходом OpenSource, сформированное таким образом описание и набор инструкций выкладывается в открытый доступ через сеть Интернет.

Тенденция к переходу на Open Source ПО носит международный характер. Так, например, правительство Франции переходит на применение именно такого программного обеспечения [goo.gl/h4QMmj].



Программное обеспечение, разрабатываемое в соответствии с подходом OpenSource, имеет ряд принципиальных отличий по сравнению с коммерческим программным обеспечением. Подавляющее число Open Source ПО бесплатное. Основная масса Open Source ПО может использоваться в коммерческих целях без ограничений. Возможность редактирования ис-

ходного кода Open Source позволяет очень гибко настраивать и даже пере-
страивать программное обеспечение.

Безусловным преимуществом коммерческих продуктов является большая история их разработки и возможность значительного финансирования, позволяющего как привлекать самых лучших специалистов, так и приобретать лицензии на другое ПО для внедрения в свои разработки.

Можно проследить ряд тенденций, которые со временем все больше нивелируют данные преимущества:

- с течением времени все меньший процент коммерческих продуктов имеет большую историю разработки по сравнению с ПО Open Source;
- самые лучшие разработчики ПО зачастую не только имеют опыт работы в Open Source проектах и поддерживают их параллельно с основной работой, но и выбираются работодателем по опыту успешного участия в подобных проектах;
- большое количество современных программных инструментариев относится к типу OpenSource и не требует больших вложений на лицензирование и использования в крупных проектах.

Если для предприятий, осуществляющих крупносерийное и массовое производство, выбор между OpenSource и коммерческим ПО должен быть строго взвешен и переход на OpenSource потребует серьезных затрат на реинжиниринг, то для предприятий специализирующихся на мелкосерийном производстве обратная ситуация, когда с учетом современных условий использования ПО предпочтительнее применять программы типа OpenSource.

Для МИП нет такой неоднозначности в выборе программного и аппаратного обеспечения. В условиях МИП применение коммерческого ПО рассматривается в последнюю очередь и в основном для тех случаев, когда нет аналогов среди Open Source (по данным интернет-ресурсов [goo.gl/P8mUVG] и [goo.gl/kdcBs8]). В табл. 2.1 приведены различные примеры коммерческого программного обеспечения, применяемого для решения повседневных и технических задач, а также их аналогов среди Open Source.



Open Source аналоги известных коммерческих программ

Тип программ	Коммерческое ПО	Аналоги из Open Source
Работа с документами	Microsoft Office	OpenOffice, LibreOffice
Антивирусы	DrWeb, KAV, NOD32	Moon Secure AV, ClamWin
Межсетевые экраны	Kerio WinRoute Firewall	WIPFW, PeerBlock, PeerGuardian
Архиваторы	Winrar, WinZip	7Zip, Ark, Disk ARchiver, FreeArc
Запись CD/DVD	Nero	Infra Recorder, Brasero, K3b, cdrtools
Файл-менеджеры	Total Commander	muCommander, Double Commander, Far Manager
CAD	AutoCAD	BRL-CAD, TinyCAD, Kicad, OCTREE, gCAD3D, FreeCAD, LibreCAD
3D-моделирование	3D Max, Maya	Wings 3D, Blender, OpenFX, K-3D, Kerkythea, Sweet Home 3D, Structure Synth
Векторная графика	Corel Draw	Inkscape, OpenOffice/LibreOffice Draw, Sodipodi
CAE	ANSYS, Digimat	SALOME, Calculix, Code Saturne, Elmer, Gerris, OpenFOAM, SU2
PDM/PLM	ENOVIA SmarTeam	OpenPLM
CAM	Cimatron	HeeksCNC (HeeksCAD + HeeksCNC)

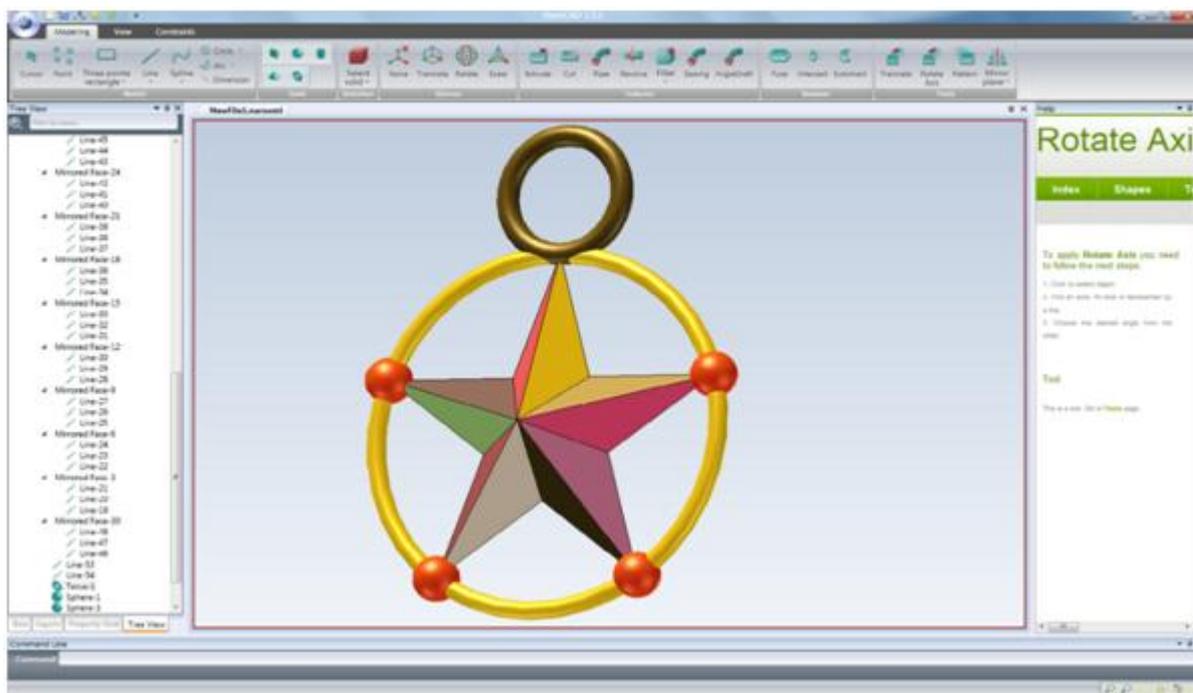
2.2.1 Open Source CAD программное обеспечение

Существует более десятка CAD-систем типа Open Source. Достаточно развитыми являются единицы, хотя многие новые системы уже обладают весомыми преимуществами перед остальными. Так, система параметрического трехмерного моделирования «SOLVESPACE», разрабатываемая одним программистом, позволяет создавать 2D и 3D конструкции, а также формировать трехмерные аннотации и конструировать сборки из нескольких деталей.

Среди развитых средств трехмерного моделирования можно выделить системы SALOME, HeeksCAD и FreeCAD. Каждая из них имеет свою специализацию, накладывающую ограничения на дополнительный функционал.

NaroCAD

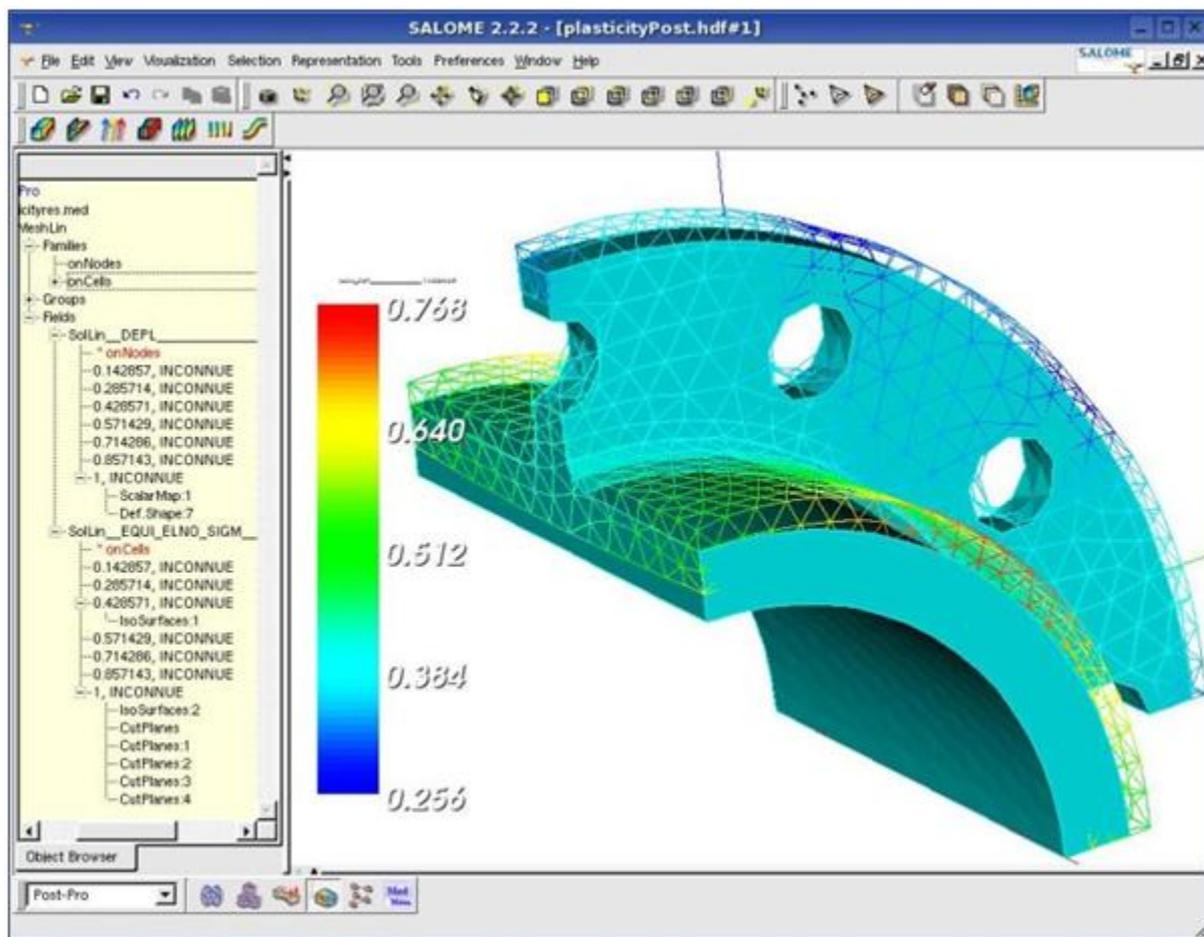
NaroCAD – трехмерная CAD-система с возможностью параметрического моделирования, основанная на использовании набора специализированных инструментальных библиотек OpenCascade. Данная система позволяет осуществлять твердотельное моделирование, но пока ее функционал достаточно ограничен.



SALOME

Система SALOME имеет достаточно мощные средства создания конечно-элементных сеток и с использованием ряда совместимых решателей позволяет производить различные расчеты на уровне с коммерческими CAE-системами. CAD-составляющая в этой системе более ограничена и включает в себя возможности работы с примитивами и создания NURBS-кривых. Совмещение этого функционала с импортом моделей из форматов STEP и IGES позволяет выполнять все задачи трехмерного моделирования, которые могут потребоваться в CAE-системе.

Продукты марки SALOME распространяются на условиях GNU Lesser General Public License. Платформа SALOME используется как база для проекта NURESIM (European Platform for NUClear REactor SIMulations), который предназначен для полномасштабного моделирования ядерных реакторов. В основе SALOME прежде всего лежит концепция объектно-ориентированного программирования.

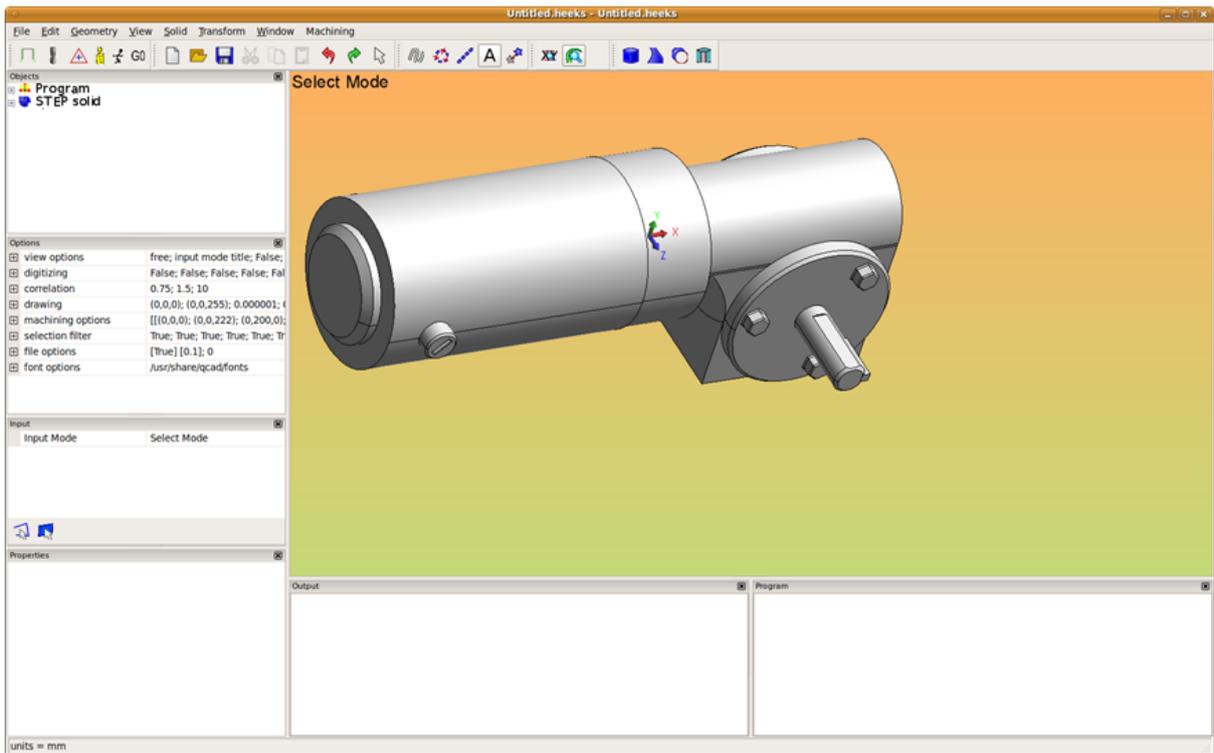


HeeksCAD

HeeksCAD в свою очередь имеет более функциональные средства твердотельного моделирования, а именно:

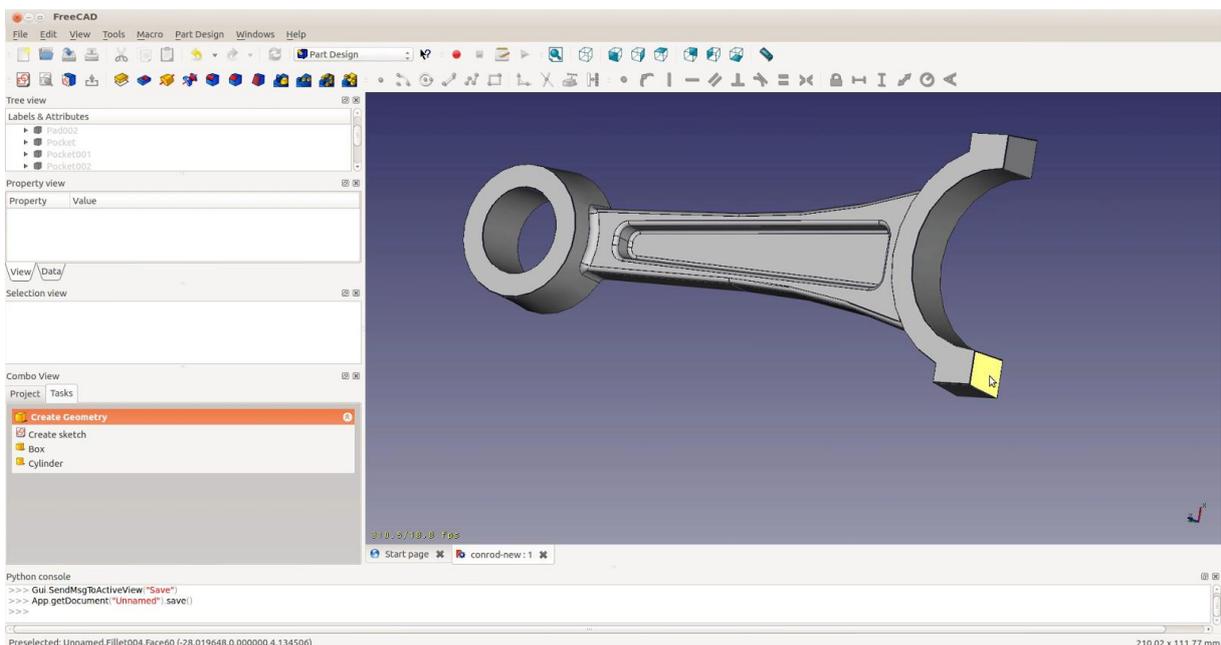
- Импорт моделей или чертежей из форматов STEP, IGES, DXF.
- Экспорт в IGES, STEP, STL, HPGL или даже в G-Code с помощью САМ-плагина.
- Рисование геометрии (линии, точки, окружности, дуги).
- Создание новых примитивов или получение моделей с помощью выдавливания эскизов.
- Изменение моделей булевыми операциями.

Программа может быть расширена дополнительными модулями (например, САМ-модуль HeeksCNC).



FreeCAD

Наиболее развитой CAD-системой параметрического твердотельного моделирования среди Open Source проектов считается FreeCAD. В состав FreeCAD входит ряд модулей для моделирования, которые могут быть вызваны как по отдельности, для большего удобства работы с инструментарием, так и все вместе. Рассмотрим основные модули, которые включены в программу FreeCAD начиная с версии 0.14.



1. Sketcher Workbench

Модуль для создания эскизов. Поддерживает использование стандартного набора кривых, а также задание размеров и ограничений.

2. PartDesign Workbench



Базовый инструмент для построения трехмерных твердотельных моделей на основе набора эскизов. В основном здесь используются операции «выдавливания», «выреза» и «вытягивания», которые представлены в коммерческих системах. Также имеются функции скругления, построения фасок и формирование массивов [goo.gl/s4X4po].

3. Part Module



Второй модуль для формирования твердотельной модели. Включает набор инструментов для параметрического моделирования, в том числе наборы примитивов (сфера, конус, цилиндр, куб, тор) и булевы операции над моделью (вычитание, пересечение, объединение). Отдельно представлены инструменты для построения поверхностей по сечениям или другим кривым [goo.gl/xpFMbP].

4. Mesh Workbench



Специализированный модуль, предназначенный для импорта/экспорта полигональных моделей, которые могут быть особенно полезны при работе с объектами сложной формы, например, корпусными изделиями, изготавливаемыми методом трехмерной печати [goo.gl/2xo7qb].

5. Drawing module

Модуль для создания чертежей. Включает минимальный набор инструментов для создания чертежа, видов, основной надписи и выгрузки получившегося чертежа в векторном формате.

Среди дополнительных модулей можно выделить следующие:

1. Robot Workbench

Модуль предназначен для проектирования промышленных роботов и задания их перемещения с использованием инструментария. Инструменты в модуле позволяют задать траекторию перемещения или повороты отдельных звеньев. Частично данный модуль дублирует возможности коммерческой системы DELMIA.

2. OpenSCAD Module

Модуль, обеспечивающий полноценное использование и редактирование моделей, построенных в системе параметрического программного твердотельного трехмерного моделирования OpenSCAD.

3. Arch module

Модуль для проектирования архитектурных конструкций – зданий и сооружений. Поддерживает дополнительный инструментарий для удобства такого специализированного проектирования.

4. Fem Workbench

Модуль для препроцессинга и формирования конечноэлементной сетки, необходимых при проведении инженерных расчетов.

В последних версиях FreeCAD кроме формирования обобщенной сетки появились инструменты для создания специализированных сеток в зависимости от предполагаемых расчетов. В настоящее время сообществом производится разработка модуля создания сборок и САМ-модуля. Основные инструменты, которые представлены в базовых модулях FreeCAD, отражены в прил. 1.

2.2.2 Open Source CAM программное обеспечение

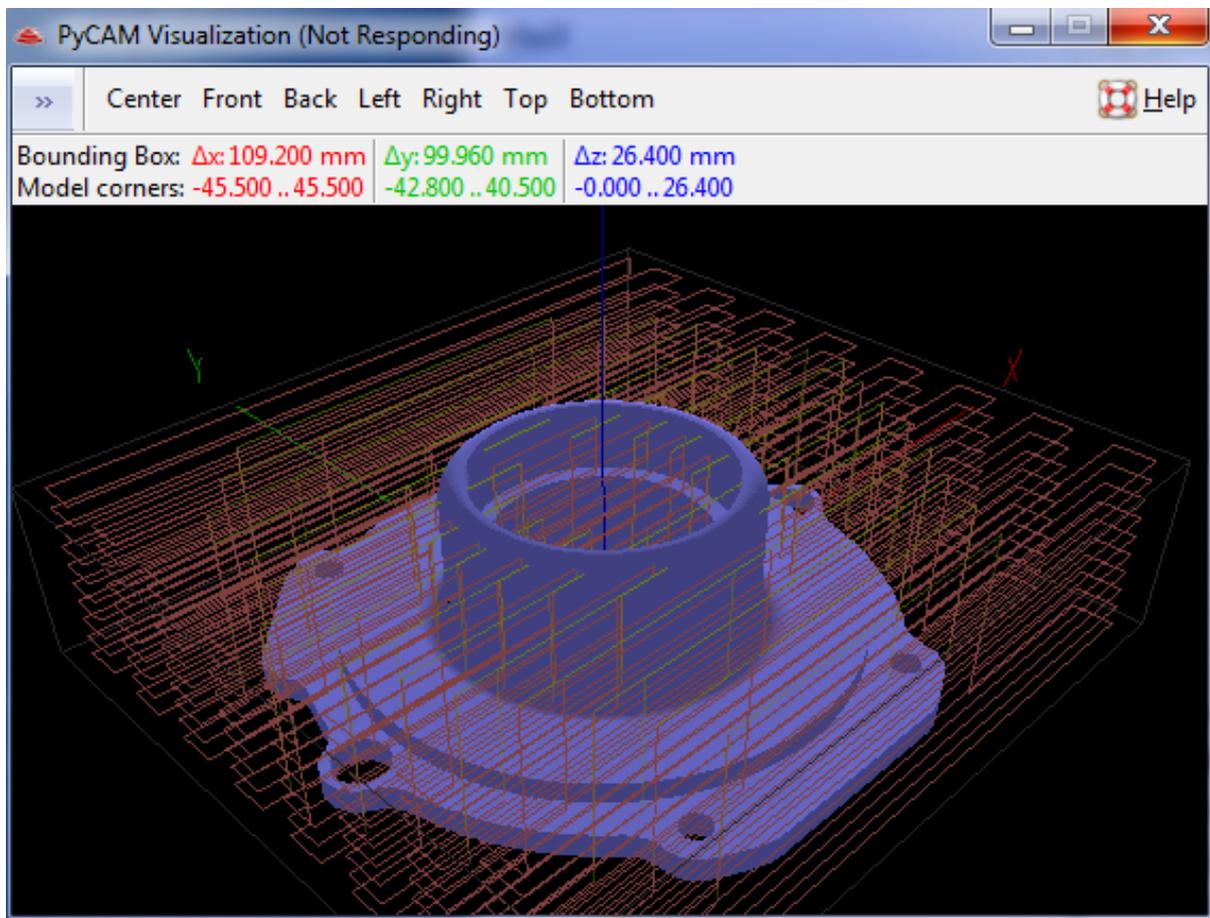
Для твердотельного моделирования все достаточно однозначно, здесь системы различаются по типам, которые позволяют проводить проектирование с использованием либо примитивов, либо эскизов, либо и того и другого одновременно. С другой стороны системы, позволяющие подготавливаться к производству деталей, могут различаться как чисто по сфере применения (например, токарная обработка, фрезерная или электроэрозионная обработка), так и по программно-аппаратному уровню.

По последнему критерию могут различать системы, которые предназначены для управления оборудованием, системы, осуществляющие ге-

нерацию G-кода на основе трехмерной модели и системы-драйверы, обеспечивающие трансляцию G-кода в «машинный» код. Все три уровня представлены в виде того или иного программного обеспечения Open Source. Такие программы как EMC² CNC Controller в совокупности со средствами полного управления станком в виде среды LinuxCNC обеспечивают поддержку всего комплекса мероприятий, необходимых для получения изделия на основе G-кода. С точки зрения информационной поддержки ТПП наибольший интерес имеют системы класса CAM, которые обеспечивают получение G-кода. Среди программного обеспечения Open Source можно выделить несколько CAM-систем.

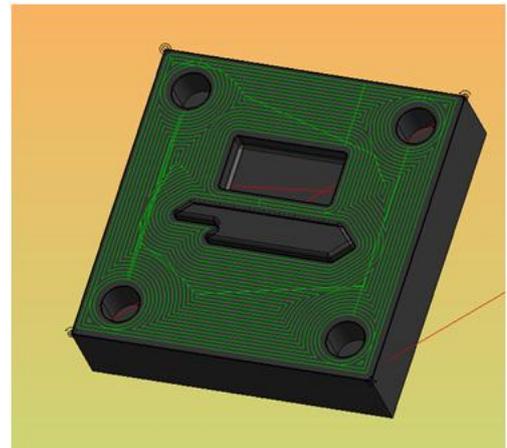
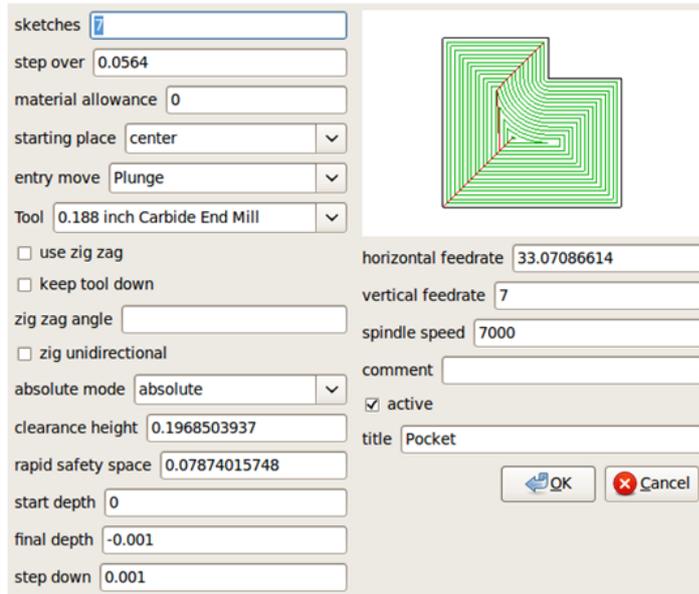
PyCAM

PyCAM представляет собой систему генерации управляющих программ для трехкоординатных станков с числовым программным управлением, выпускаемую под свободной лицензией. В качестве входных данных система получает трёхмерную модель в формате STL или двумерный контур в форматах DXF или SVG и генерирует программу в формате ISO-7bit (последовательность G-кодов). Помимо непосредственно постпроцессинга PyCAM позволяет визуализировать путь перемещения инструмента.



Heeks CNC

HeeksCNC является плагином для HeeksCAD. За счет этого построение модели и ее обработка может быть произведена в единой среде моделирования. Также доступен импорт моделей с использованием форматов-интерфейсов (STEP, IGES).



Для обработки доступны различные инструменты, которые подходят в большей или меньшей степени мере в зависимости от геометрии всей детали и обрабатываемого участка.

Имеются следующие стратегии обработки:

- Pocket – обработка кармана.
- Zig Zag – обработка по зигзагу.
- Adaptive Roughing – адаптивная черновая обработка.
- Drilling – сверление.
- Rough Turning – черновая обработка.
- Counterbore – зенковка.
- Также имеются вспомогательные операции для обработки:
 - Locating – определение расположения
 - Fixtures – фиксация в соответствии с осями координат
 - Probing Operations for location and alignment – операции калибровки и выравнивания
 - Tool Table – таблица инструментов

За счет использования такого унифицированного инструментария можно осуществлять 3-х, 4-х и 5-ти координатную фрезерную обработку канавок, пазов, фасонных поверхностей, фасок, скруглений, выполнять гравировку и т. п.

HeeksCNC позволяет создавать и гибко настраивать инструменты для обработки или импортировать уже существующие наборы описаний инструментов. В системе представлено множество параметров, которые описывают процесс обработки, включая множество детальных настроек режимов резания, а также схему процесса.



После проведения моделирования может быть сформирован G-код, который используется при последующем изготовлении изделия на станках с ЧПУ. Для этого в HeeksCNC имеется возможность выбора пост-процессора, применяемого на различных группах оборудования.



Существует еще множество других OpenSource CAM-систем (например, OpenSCAM [goo.gl/o1gbT6] или Blender CAM [goo.gl/5Q9M4R]), которые имеют схожий или меньший функционал чем HeeksCNC, либо ограниченную область применения, позволяющие, тем не менее, подобрать средства под решения большинства задач, которые могут стоять перед САМ-системами.

2.3 Прототипирование и производство микроэлектронных приборов

На сегодняшний день основным направлением развития современной микроэлектроники является всё большая интеграция различных модулей и компонентов в составе микроконтроллеров и микропроцессоров. Интегральные схемы (ИС), на базе которых они построены, становятся все сложнее и уже могут заменить собой целое устройство. Появился новый термин: System-on-a-Chip (SoC) или «система на кристалле».

«Система на кристалле» способна работать как с цифровыми сигналами, так и с аналоговыми или аналого-цифровыми, а также частотами радиодиапазона, произвольно комбинируя их. Подобная система включает в себя одно или несколько вычислительных ядер², банк памяти, источник опорного

² Зачастую объединенных с процессором обработки цифровых сигналов – англ. *Digital Signal Processor*, сокр. *DSP*.

тактового сигнала и различные периферийные устройства: таймеры, компараторы, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, коммуникационные модули, мониторы питания, порты ввода-вывода общего назначения и так далее.

Очевидно, что подобные ИС в совокупности с различными датчиками и силовыми или исполнительными модулями могут стать основой многих современных высокотехнологичных электронных приборов. Однако, высокая интеграция модулей и постоянное совершенствование технологии производства ИС привели к уменьшению размеров корпусов рассматриваемых микросхем и увеличению количества выводов.

Если в 80-х годах наиболее распространенным типом корпуса ИС был так называемый *Dual In-line Package* (сокр. *DIP*), представляющий собой микросхему с шагом выводов 0,1" (2,54 мм) и количеством выводов не более 64, то сейчас чаще все используются *Ball Grid Array* (сокр. *BGA*) – поверхностно-монтируемые ИС с количеством контактов до 1936 при размере корпуса 45x45 мм. Применение ИС в подобных корпусах сопряжено с определенными проблемами, а именно:

- *Высокая сложность проектирования и производства печатных плат.* Для работы с современными ИС уже недостаточно двухслойных плат, количество слоев должно быть в диапазоне 4–8, в противном случае некоторые выводы микросхемы будут не задействованы. То же касается и ширины проводников на плате, типичная ширина дорожки должна быть порядка 100–200 мкм, что дополнительно усложняет процесс изготовления плат.
- *Высокая сложность контроля качества сборки электронного устройства.* Малые габариты ИС требуют тщательного визуального контроля (автоматизированного или ручного), а также наличия специального высокоточного оборудования для автоматического внутрисхемного тестирования. При использовании ИС в корпусах типа BGA ко всему прочему добавляется необходимость применения рентгенографического оборудования.
- *Низкая механическая прочность контактов (выводов) современных поверхностно-монтируемых микросхем в сравнении с выводными ИС, монтируемыми в отверстие,* что требует дополнительных технологических операций (например, заливка специальным полимерным веществом – компаундом).

Большинство из вышеописанных проблем успешно решены в крупносерийном и массовом производстве, но для единичного или мелкосерийного производства они являются преградой, ограничивающей возможность выпускать сложные электронные приборы.

В данном разделе будут рассмотрены два основных подхода, позволяющие частично или полностью преодолеть данное ограничение:

1. Использование готовых модулей-полуфабрикатов с последующей их доработкой и объединением в готовое изделие.
2. Отказ от использования печатных плат, произведенных в заводских условиях, в пользу упрощенных методов.

Нетрудно заметить, что второй подход напрямую вытекает из первого. Действительно, при работе с готовыми модулями нужна только лишь объединяющая плата, основной функцией которой является коммутация этих модулей. И такие несложные платы можно производить ограниченными сериями непосредственно на производственных мощностях МИП.

2.3.1 Использование готовых модулей-полуфабрикатов

Данные модули можно условно разделить на три основные категории:

1. Периферийные модули расширения.
2. Процессорные модули и отладочные платы.
3. Микрокомпьютеры.

Рассмотрим эти три категории более подробно.

Периферийные модули расширения

Простейшие модули, обычно выполняющие строго одну функцию. Как правило, представляют собой микросхему с так называемой «обвязкой» – совокупностью пассивных электронных компонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей и так далее) и интерфейсного разъема. Перечислим основные типы модулей.

1. Датчики

- Датчики температуры.
- Датчики влажности.
- Газоанализаторы.
- Пирозлектрические датчики движе-



Газоанализатор MQ-6 ния.

- Датчики пламени.
- Датчики уровня воды.
- Датчики дождя.
- Твердотельные альтиметры.
- Твердотельные трехосевые гироскопы.
- Твердотельные трехосевые акселерометры.
- Датчики тока.
- Датчики шума.
- Датчики касания.
- Датчики цвета объекта.
- Датчики влажности почвы.
- Ультразвуковые дальнометры.
- Датчики Холла.
- Датчики освещенности.
- Датчики вибрации.
- Электронные магнетометры.
- Датчики детонации.
- Датчики радиации.

2. Коммуникационные модули

2.1. Проводные

- Ethernet модули.
- Преобразователи RS232-UART.
- Преобразователи USB-UART.

2.2. Беспроводные

- Модули мобильной связи стандарта GSM.
- Wi-Fi модули.
- Bluetooth модули.
- ZigBee модули.
- Трансмиттеры на гражданских частотах.
- FM³ приемники.
- GPS⁴ приемники.



Пирозлектрический датчик движения HC-



Датчик уровня воды



Ethernet модуль на базе контроллера ENC28J60



Bluetooth модуль на базе контроллера BC417

³ Сокращение от англ. *Frequency Modulation* – частотная модуляция.

3. Силовые модули

- Модули зарядки аккумуляторных батарей (литий-ионных, литий-полимерных, никель-металлгидридных и т. д.).
- Линейные преобразователи напряжения.
- Реле с гальванической развязкой.
- Драйверы коллекторных двигателей.
- Драйверы бесколлекторных двигателей.
- Драйверы шаговых двигателей.
- Драйверы сервомоторов.
- Драйверы мощных светодиодов.



Преобразователь напряжения на базе микросхемы LM2596S

4. Прочие модули

- Дисплейные модули.
- RFID⁵ модули.
- Слоты карт памяти.
- Модули часов реального времени.
- ЦАП/АЦП модули.
- Модули генерации сигналов.
- Измерительные модули.
- Часы реального времени.



Дисплейный модуль HD44780

2.3.2 Процессорные модули и отладочные платы

Процессорные модули

В отличие от периферийного модуля расширения основной процессорного модуля является микроконтроллер общего назначения, запрограммированный в соответствии с задачей, выполняемой конкретным прибором. К основным функциям процессорного модуля относятся: получение и обработка сигналов от датчиков, управление исполнительными органами прибора, связь прибора с персональным компьютером, синхронизация точного времени и так далее. Рассмотрим основные элементы типичного процессорного модуля (рис. 2.1).

⁴ Сокращение от англ. *Global Positioning System* – система глобального позиционирования. Спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение во всемирной системе координат.

⁵ Сокращение от англ. *Radio Frequency Identification* – радиочастотная идентификация. Способ автоматической идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках.

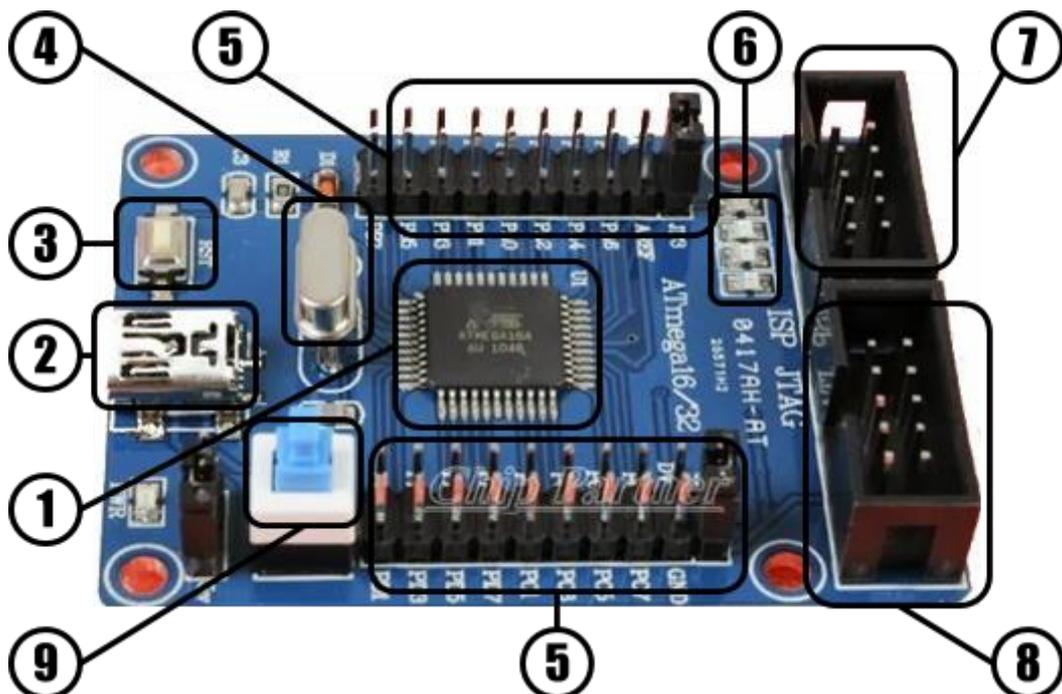


Рис. 2.1. Процессорный модуль на базе микроконтроллера ATmega16

1. Микроконтроллер ATMEL ATmega16 с архитектурой AVR.
2. Разъем microUSB для подключения к персональному компьютеру.
3. Кнопка перезагрузки контроллера.
4. Источник тактового сигнала – кварцевый резонатор.
5. Выведенные на штырьковую линейку порты ввода-вывода общего назначения (англ. *General Purpose Input-Output*, сокр. *GPIO*).
6. Индикаторные светодиоды.
7. Интерфейс для подключения программатора⁶, работающего по протоколу ISP⁷.
8. Интерфейс для подключения программатора, работающего по протоколу JTAG⁸.

⁶ Программатор – аппаратно-программное устройство, предназначенное для записи/считывания информации в постоянное запоминающее устройство микроконтроллера.

⁷ Сокращение от англ. *In-System Programming* – внутрисхемное программирование. Технология программирования электронных компонентов, позволяющая программировать компонент, уже установленный в устройство.

⁸ Сокращение от англ. *Joint Test Action Group* – название рабочей группы по разработке стандарта IEEE 1149. Впоследствии данная аббревиатура стала обозначать специализированный интерфейс программирования и отладки программ для микроконтроллеров.

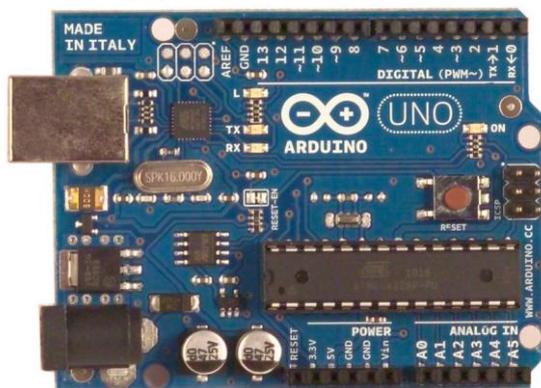
Отладочные платы

Отладочные платы отличаются от процессорных модулей наличием встроенного программатора. Раньше отладочные платы использовались только в лабораторных условиях для тестирования функциональности того или иного микропроцессора или микроконтроллера. На сегодняшний день, в связи бурным развитием микроэлектроники, цены на многие популярные отладочные платы существенно снизились, что позволяет использовать их наравне с обычными процессорными модулями в устройствах и приборах, выпускаемых единичными партиями.

Перечислим наиболее распространенные отладочные платы, которые можно использовать для создания микроэлектронных приборов:

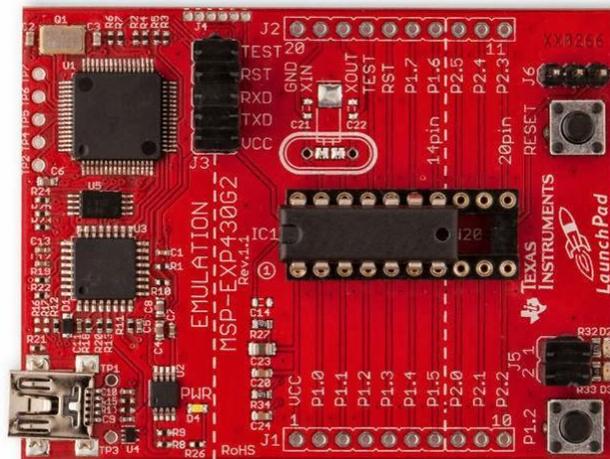
1. Arduino

Плата построена на базе микроконтроллера с архитектурой AVR. Основными особенностями являются очень низкая цена (от 5 долларов США) и возможность программирования на специальной упрощенном языке Processing/Wiring.



2. MSP430 Launchpad

Аналог arduino, плата построена на микроконтроллере семейства MSP430, также отличается невысокой ценой.



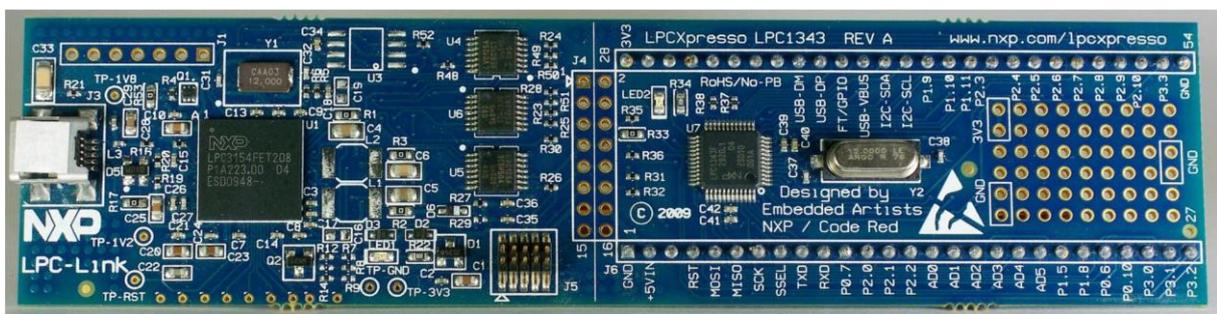
3. STM32 DISCOVERY

Отладочная плата, построенная на базе тридцатидвухбитного микроконтроллера с архитектурой ARM Cortex-M4. Основной особенностью является наличие на плате большого количества встроенных периферийных модулей таких, как трехосевой гироскоп, датчик звука и так далее.



4. LPCXpresso

Также построенная на процессоре семейства ARM Cortex-M4 плата, отличающаяся очень низким энергопотреблением.



Микрокомпьютеры

Понятие микрокомпьютер появилось достаточно давно и в разные годы трактовалось по-разному. В последнее десятилетие под микрокомпьютером обычно понимают одноплатный модуль небольшого размера, имеющий сверхнизкое энергопотребление. Как правило, подобные микрокомпьютеры создаются на базе микропроцессоров с архитектурой ARM и работают под управлением свободной операционной системы. Одним из первых массовых и коммерчески успешных микрокомпьютеров стал выпущенный в 2012 году одноплатный компьютер Raspberry Pi.

Основными особенностями Raspberry Pi являются:

- Центральный процессор Broadcom BCM2835 с архитектурой ARM11, тактовая частота 700 МГц, совмещен с графическим процессором Broadcom VideoCore IV и цифровым сигнальным процессором.
- Оперативная память стандарта SDRAM объемом 512 МБ.
- 2 порта USB 2.0.
- Разъем для подключения внешней камеры.
- Композитный видеовыход с поддержкой стандартов PAL и NTSC.
- Цифровой видеовыход стандарта HDMI.
- Последовательный интерфейс для подключения внешних жидкокристаллических панелей.
- Цифровой и аналоговый аудиовыходы.
- Слот для карт памяти формата SD/MMC.
- Сетевой адаптер с поддержкой скоростей передачи данных 10 или 100 Мб/с.
- Порты ввода-вывода общего назначения с поддержкой протоколов SPI и I²C, а также универсальный асинхронный приёмопередатчик.
- Напряжение питания 5 В, потребляемая мощность не более 3,5 Вт.
- Размеры печатной платы 85,6 мм × 53,98 мм; вес 45 г.
- Поддерживаемые операционные системы: Arch Linux ARM, Debian GNU/Linux, Fedora, FreeBSD, NetBSD, Plan 9, Raspbian OS, RISC OS, Slackware Linux, Pidora OS.
- Заявленная производителем розничная цена 35 долларов США.

Raspberry Pi может стать основой сложных высокотехнологичных приборов, для управления которыми уже недостаточно обычных микроконтроллеров. Важная особенность любого микрокомпьютера – это воз-

возможность установки операционной системы общего назначения, что значительно расширяет возможности проектируемого электронного прибора и упрощает процесс разработки программного обеспечения для него.

На сегодняшний день помимо Raspberry Pi существуют и другие микрокомпьютеры, схожие с ним по характеристикам и цене. Перечислим некоторые из них (в скобках приведено краткое описание аппаратной части):

- *Cubieboard* (1 ГГц ARM Cortex-A8, 1 ГБ DDR3, GPU Mali400, 96 GPIO – I²C, SPI, LCD).
- *Hackberry* (1,2 ГГц Allwinner A10 ARM Cortex-A8, 512 МБ DDR3, GPU Mali400).
- *VIA APC-8750* (800 МГц VIA ARM Cortex-A9, 512 МБ DDR3, JTAG, GPIO – SPI, I²C).
- *ODROID-U2* (1,7 ГГц Samsung Exynos4412 Prime ARM Cortex-A9 Quad Core, 2 ГБ LP-DDR2, GPU Mali400).
- *pcDuino* (1 ГГц ARM Cortex-A8, 1 ГБ DDR3, GPU Mali400, GPIO).
- *A13-OLinuXino-MICRO* (1 ГГц A13 ARM Cortex A8, 512 МБ DDR3, GPU Mali400, RTC, 74 GPIO – NAND flash, LCD, I²C, UART, SDIO).
- *Pandaboard ES* (1,2 ГГц OMAP4460 ARM Cortex-A9 Dual Core, 1 ГБ DDR2, GPU Imagination Technologies PowerVR SGX540, JTAG, GPIO – UART, I²C, GPMC, USB, MMC, DSS, ETM LCD).
- *SK-iMX53-OEM* (800 МГц FreeScale iMX536 ARM Cortex-A8, 256 МБ DDR2, GPIO – LCD, LVDS, CSI, SD, UART, CAN, UART, SPI, I²C).
- *MarsBoard* (1 ГГц Allwinner A10 ARM Cortex-A8, 1 ГБ DDR3, GPU Mali400, GPIO).
- *Minnowboard* (1 ГГц Intel Atom E640, 1 ГБ DDR2, GPU Intel GMA 600, GPIO).
- *IGEPv2* (720 МГц TI OMAP3530 ARM Cortex-A8, GPU Imagination Technologies PowerVR SGX530, DSP, RS-485, RS-232, JTAG, GPIO – UART, McBSP, McSPI, I²C).

В заключении следует отметить, что использование микрокомпьютеров для управления электронными приборами в большинстве случаев является избыточным. Микрокомпьютер – это универсальное, но в тоже время достаточно дорогое устройство. Его использование допустимо только для наиболее сложных приборов, например, координатно-измерительных машин или установок быстрого прототипирования.

2.3.3 Протоколы взаимодействия модулей

Взаимодействие модулей осуществляется за счет передачи аналоговых или цифровых сигналов. Как правило, аналоговые сигналы выдают различные датчики, после получения и оцифровки эти сигналы могут быть обработаны процессорным модулем или микрокомпьютером. Цифровые сигналы могут быть обработаны напрямую, протокол передачи может быть либо специальным (описанным в технической документации на тот или иной модуль или датчик), либо унифицированным. В данном разделе будут рассмотрены основные унифицированные цифровые протоколы взаимодействия модулей.

*UART*⁹

UART – модуль вычислительных устройств, предназначенный для связи с другими цифровыми приборами, имеющими подобный модуль. Является старейшим и наиболее распространенным физическим интерфейсом передачи данных. Осуществляет преобразование данных для их передачи/приема с помощью последовательной линии связи.

Представляет собой логическую схему, с одной стороны подключённую к шине вычислительного устройства, а с другой имеющую два или более выводов для внешнего соединения. Обычно UART является периферийным модулем микроконтроллеров общего назначения, который позволяет им взаимодействовать между собой или с персональным компьютером напрямую. Для связи используются два сигнальных провода: передачи (TX) и приема (RX). Прием и передача осуществляется одновременно и независимо друг от друга, то есть в асинхронном режиме, что следует из названия шины. Также возможна связь через специальные медиаконвертеры (преобразователи физической среды передачи данных), например, UART-RS232, UART-USB, UART-bluetooth, UART-Ethernet, UART-Wi-Fi и так далее.

Передача данных в UART осуществляется по одному биту за равные промежутки времени в соответствие со стандартным рядом скоростей: 300; 600; 1200; 2400; 4800; 9600; 19200; 38400; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 бод, где 1 бод равен 1 биту данных.

Синхронизация потока осуществляется по так называемым синхрометкам. Каждый передаваемый байт данных (8 бит) снабжается стартовым

⁹ Сокращение от англ. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* – универсальный асинхронный приёмопередатчик, сокр. *УАПП*.

битом и стоповым битом, а также необязательным битом четности. Стартовый бит всегда равен нулю, стоповый бит равен единице и может занимать 1, 1,5 или 2 временных интервала. Увеличение временного интервала стопового бита позволяет уменьшить вероятность рассинхронизации потока. Бит четности является результатом операции «исключающее или» (XOR) над всеми битами данных. Параметры канала устанавливаются заранее в начале сеанса связи.

Чтобы выяснить реальную пропускную способность канала передачи данных в байтах в секунду надо разделить скорость передачи данных в бодах на 10 (на 11 в случае использования бита четности и на 12 в случае, когда используются 2 стоповых бита вместо 1). Например, для скорости 9600 бод при использовании одного стопового бита без контроля четности реальная скорость будет равна $9600/10=960$ байт/с.

Для формирования временных интервалов передающих и приёмный UART имеют источник точного времени (тактирования). Точность этого источника должна быть такой, чтобы сумма погрешностей (приёмника и передатчика) установки временного интервала от начала стартового импульса до середины стопового импульса не превышала половины (лучше четверти) битового интервала. Для 8-бит посылки $0,5 \div 9,5 = 5\%$ (в реальности не более 3%). Поскольку эта сумма ошибок приёмника и передатчика плюс возможные искажения сигнала в линии, то рекомендуемый допуск на точность тактирования UART не более 1,5%. В микроконтроллерах, как правило, в качестве источника тактового сигнала используется внутренний осциллятор с цифровым управлением, либо внешний высокочастотный кварцевый резонатор.

SPI¹⁰

SPI – последовательный синхронный стандарт передачи данных в режиме полного дуплекса, разработанный компанией Motorola для обеспечения простого и недорогого сопряжения микроконтроллеров и периферии. SPI также иногда называют четырёхпроводным (англ. *four-wire*) интерфейсом.

В отличие от стандартного последовательного порта (англ. *standard serial port*), SPI является синхронным интерфейсом, в котором любая передача синхронизирована с общим тактовым сигналом, генерируемым ведущим устройством (процессором). Принимающая (ведомая) периферия син-

¹⁰ Сокращение от англ. *Serial Peripheral Interface* – последовательный периферийный интерфейс, шина SPI.

хронизирует получение битовой последовательности с тактовым сигналом. К одному последовательному периферийному интерфейсу ведущего устройства-микросхемы может присоединяться несколько микросхем. Ведущее устройство выбирает ведомое для передачи, активируя сигнал «выбор кристалла» (англ. *chip select*) на ведомой микросхеме. Периферия, не выбранная процессором, не принимает участия в передаче по SPI.

В SPI используются четыре цифровых сигнала:

- MOSI или SI — выход ведущего, вход ведомого (англ. *Master Out Slave In*). Служит для передачи данных от ведущего устройства ведомому.
- MISO или SO — вход ведущего, выход ведомого (англ. *Master In Slave Out*). Служит для передачи данных от ведомого устройства ведущему.
- SCLK или SCK — последовательный тактовый сигнал (англ. *Serial Clock*). Служит для передачи тактового сигнала для ведомых устройств.
- CS или SS — выбор микросхемы, выбор ведомого (англ. *Chip Select, Slave Select*).

I²C

Данные передаются по двум проводам – проводу данных и проводу тактов. Есть ведущий (англ. *master*) и ведомый (*slave*), такты генерирует ведущий, ведомый отвечает при приеме байта. Всего на одной двупроводной шине может быть до 127 устройств. Схема подключения – монтажное И.

Передача/прием сигналов осуществляется прижиманием линии к земле (то есть к логическому нулю), в единицу линия устанавливается сама, за счет подтягивающих резисторов номиналом 10 КОм или более.

Вся передача данных состоит из стартовой последовательности, битов данных и стоповой последовательности. Порядок изменения уровня на шинах задает тип последовательности. После старта передача одного бита данных идет по тактовому импульсу. То есть когда линия SCL в состоянии логического нуля, ведущий или ведомый выставляют бит на SDA, после чего SCL переводится в состояние логического нуля и ведущий (ведомый) считывают бит. Таким образом, протокол совершенно не зависит от временных интервалов, только от тактовых битов. Таким образом, последовательность действий при передаче следующая:

Начало передачи определяется стартовой последовательностью – переход линии SDA из состояния логической единицы (высокий уровень) в состояние логического нуля (низкий уровень) при высоком уровне на линии SCL.

При передаче информации от ведущего к ведомому, ведущий генерирует такты на линии SCL и выдает биты на линию SDA. Эти биты считывает ведомый, когда линия SCL переходит в состояние логической единицы.

При передаче информации от ведомого к ведущему, ведущий генерирует такты на линии SCL и отслеживает действия ведомого на линии SDA, то есть считывает данные. А ведомый, когда линия SCL переходит в состояние логического нуля, выдает на линию SDA бит, который мастер считывает, когда возвращает линию SCL обратно в состояние логической единицы.

Заканчивается все стоповой последовательностью, когда при высоком уровне на SCL линия SDA переходит с низкого на высокий уровень.

Изменение на шине данных в момент приема данных может быть только при низком уровне на SCL. Когда SCL в состоянии логической единицы, то идет чтение. Если SDA меняется при высоком SCL, то это уже стартовая или стоповая последовательность.

Если ведомый не может обеспечить достаточную скорость передачи данных и не успевает за ведущим, то он может насильно прижать линию SCL к земле и не давать ведущему генерировать новые такты. В таком случае ведущий должен дожидаться, когда ведомый получит текущий байт. То есть помимо генерации тактов ведущему надо следить за состоянием линии SCL и при появлении на ней логической единицы остановиться и ждать пока ведомый не вернет ее в состояние логического нуля, а затем продолжить передачу.

2.3.4 Изготовление плат

Как уже было сказано выше, модульная структура электронных приборов требует наличия объединительных (материнских) плат. Для их создания в условиях единичного и мелкосерийного производства могут быть применены следующие технологии:

1. Использование макетных плат для монтажа без пайки.
2. Использование макетных плат для монтажа с пайкой.
3. Использование метода термопереноса.
4. Использование фоторезиста.
5. Фрезерование печатных плат.

Первая технология подходит для создания «сверхбыстрых» прототипов, необходимых для проверки работоспособности той или иной кон-

струкции или управляющей программы. С помощью второй может быть создан работающий прототип изделия в единственном экземпляре, например, для демонстрации функционала готового изделия заказчику. Третья подходит как для создания прототипов, так и для установочных партий изделий. Четвертая может быть применена для создания серийных изделий, но требует высокой квалификации специалистов и значительных временных затрат. Последняя также позволяет создавать серийные изделия с высокой степенью автоматизации, но требует наличия специального оборудования и инструмента. Рассмотрим каждый из предложенных подходов более подробно.

Использование макетных плат для монтажа без пайки

Самый простой способ макетирования электронных устройств. Макетная плата для монтажа без пайки (англ. *solderless breadboard*) представляет собой массив гнезд с шагом 0,1” (2,54 мм), соединенных так, как показано на рис. 2.2.

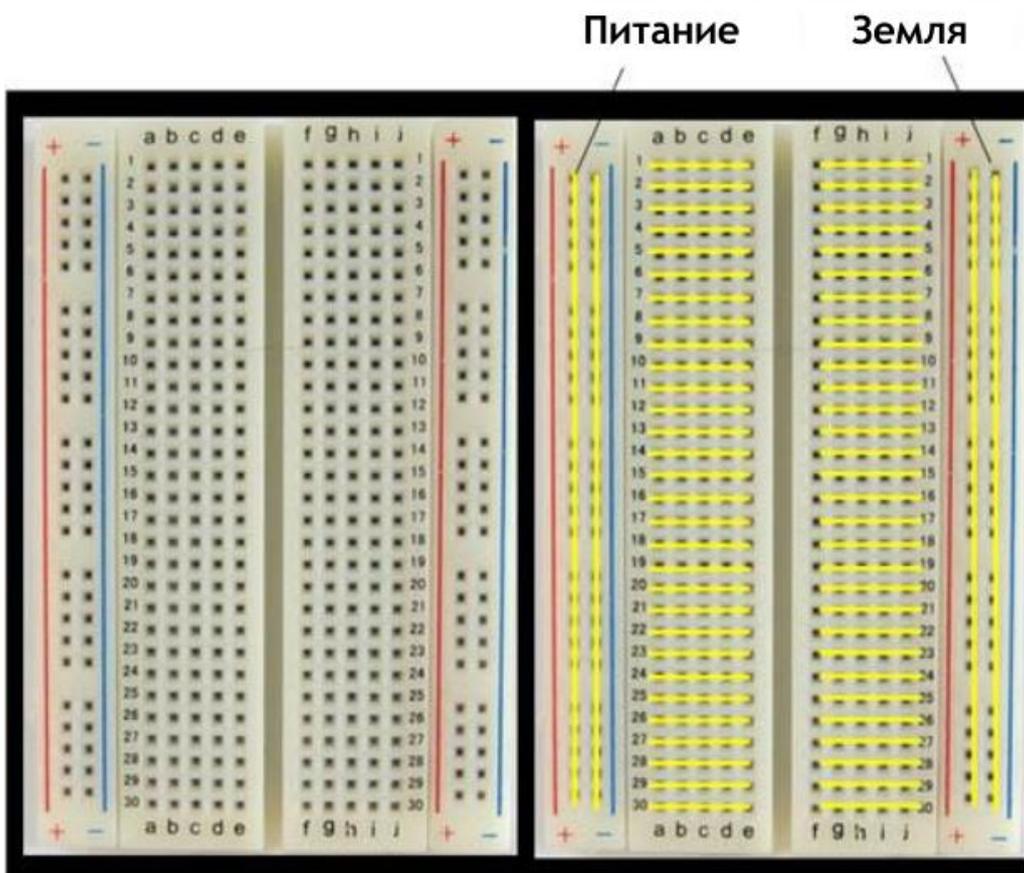


Рис. 2.2. Пример макетной платы для монтажа без пайки

Такой шаг часто используется при производстве современных радиодеталей, поэтому большинство из них может быть просто установлены

в гнезда макетной платы. Соединение компонентов осуществляется обычными медными перемычками или специальными гибкими коннекторами (рис. 2.3). Установка описываемых выше готовых модулей также не вызывает затруднений, так как любой модуль оснащен интерфейсным разъемом, представляющим собой штырьковую линейку с шагом 2,54 мм. В качественных макетных платах используются контакты из никелевых сплавов, гарантирующие надежный электрический контакт в течение 10000 циклов установки и извлечения перемычек или компонентов.

Основным достоинством макетных плат для монтажа без пайки является возможность очень быстро создавать и отлаживать прототипы элек-

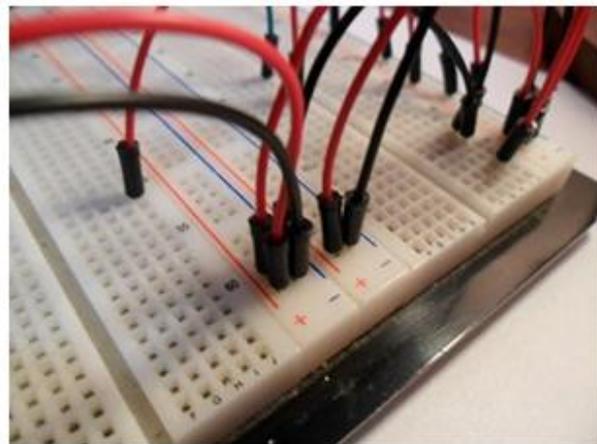
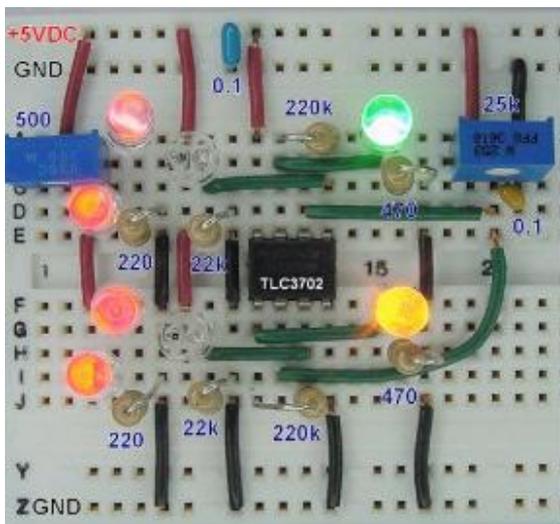


Рис.2.3. Пример устройства, созданного с помощью макетной платы для монтажа без пайки

тронных устройств, меняя схему «на лету». К недостаткам следует отнести ухудшение электрического контакта разъемов макетной платы при длительном использовании, что может нарушать работу схемы и значительно усложнит ее отладку.

Использование макетных плат для монтажа пайкой

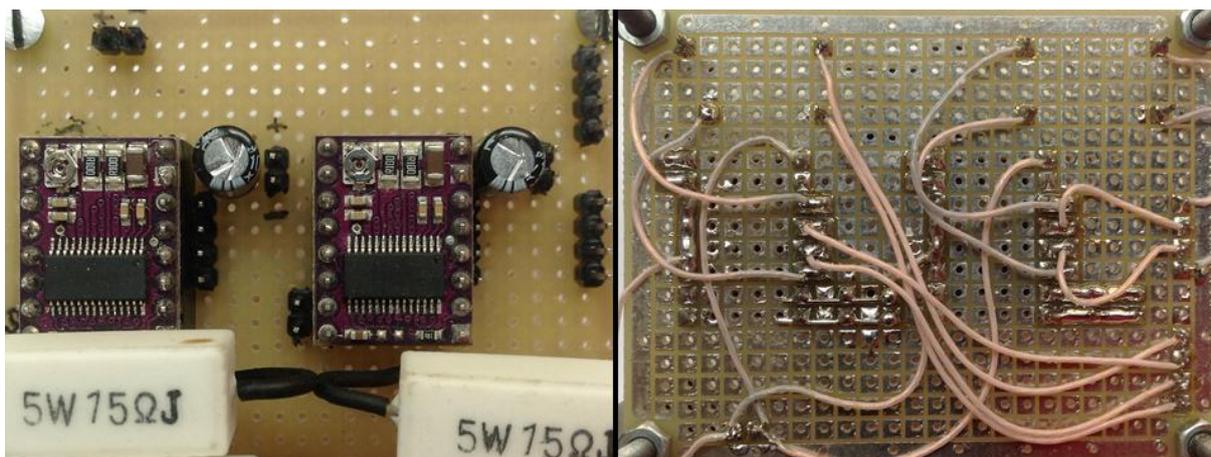


Рис. 2.4. Пример устройства, созданного с помощью макетной платы для монтажа пайкой

В данной технологии применяются стеклотекстолитовые печатные платы (рис. 2.4) заводского производства с изолированными друг от друга контактами для монтажа радиодеталей в отверстие. Шаг отверстий 2,54 мм, платы могут быть как односторонними, так и двухсторонними (с металлизацией переходных отверстий или без нее). Компоненты располагаются на плате в соответствии с электрической схемой, после чего соединяются отрезками медного изолированного провода методом навесного монтажа. Чаще всего используются многожильные провода с фторопластовой изоляцией, например МГТФ. Также допускается установка компонентов в планарных корпусах и соединение смежных отверстий с помощью капель припоя.

Основное отличие данных макетных плат от плат для монтажа без пайки заключается в возможности создания работающего прототипа, который можно использовать не только в лабораторных условиях, так как паяные контакты достаточно надежны и не боятся механического воздействия. Последнее позволяет использовать макетные платы для монтажа пайкой при демонстрации функционала разрабатываемого прибора непосредственно в той среде, где он будет эксплуатироваться. Недостатком является повышенная сложность установки компонентов методом навесного монтажа.

Использование метода термопереноса

Метод термопереноса предполагает использования специальной термотрансферной бумаги с напечатанным зеркальным рисунком печатной платы, который в дальнейшем переносится на заготовку из фольгированного стеклотекстолита с помощью термопресса. Легкость и повторяемость данного технологического процесса позволяет воспроизвести его даже

в домашних условиях. В среде отечественных радиолюбителей даже появился отдельный устоявшийся термин: *лазерно-утюжная технология* или *ЛУТ*. С помощью данного метода можно изготавливать двухсторонние печатные платы без металлизации переходных отверстий с толщиной дорожек и расстоянием между дорожками от 0,25 мм.

Рассмотрим основные этапы технологического процесса изготовления печатных плат методом термопереноса.

1 этап. Подготовка рисунка печатной платы

На данном этапе используется специальное программное обеспечение, позволяющее проектировать электрические схемы устройств и компоновку печатных плат. Существует огромное количество подобных автоматизированных систем, их подробное описание выходит за рамки данного учебного пособия, дополнительная информация может быть найдена в [10]. Результатом данного этапа является векторное изображение разработанной печатной платы.

2 этап. Печать

Для печати рисунка платы используется специальная термотрасферная бумага (реже пленка). Основными особенностями данной бумаги являются высокая термостойкость и наличие особого верхнего слоя, который позволяет легко отделять бумажную подложку после того, как рисунок будет перенесен на фольгированный стеклотекстолит.

В условиях единичного производства вместо термотрасферной бумаги могут быть использованы гляцевая фотобумага бумага или подложка от самоклеющейся пленки. Также неплохие результаты дает применение виниловой бумаги. Для печати чаще всего используется лазерная технология. Струйная может быть применена только в совокупности с использованием специальных чернил. Печать осуществляется в зеркальном отображении.

3 этап. Подготовка заготовки из фольгированного стеклотекстолита

Подготовка заготовки из фольгированного стеклотекстолита включает в себя очистку поверхностного слоя меди от окислов с последующим обезжириванием. Очистка от окислов осуществляется с помощью любых мягких абразивных материалов, например, абразивных паст, порошков или увлажненной мелкозернистой наждачной бумаги. Хорошие результаты показывают даже простые хозяйственные абразивные чистящие средства. Для обезжиривания поверхности используют ацетон, бензин или любое другое обезжиривающее средство органического происхождения.

4 этап. Термоперенос

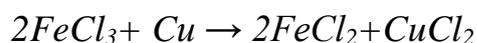
Для переноса используется термопресс или термовал. В случае отсутствия данного оборудования возможно применение пленочного ламинатора или даже обычного бытового утюга с последующей прокаткой заготовки обрезиненным валиком. Время термопереноса определяется экспериментальным путем.

5 этап. Удаление бумажной подложки

В случае использования специальной термотрасферной бумаги данный этап не требуется, так как подобная бумага после термопереноса рисунка отделяется от заготовки естественным путем. В случае же использования, например, глянцевой фотобумаги, необходимо очистить поверхность заготовки от бумажной подложки. Делается это под струей теплой воды с помощью жесткой щетки.

6 этап. Травление заготовки

В процессе травления заготовки удаляется слой меди с участков, не закрытых тоном. Для травления обычно используют шестиводное (либо безводное) хлорное железо. Происходит следующая химическая реакция:



Чаще всего процесс протекает пассивно, то есть заготовка просто помещается в травильный раствор на определенное время. Для ускорения процесса используются дополнительные технические средства: пузырьковая ванна (барботажа), виброподвес или даже специальная установка для струйного травления (ротаспрей, рис. 2.5).

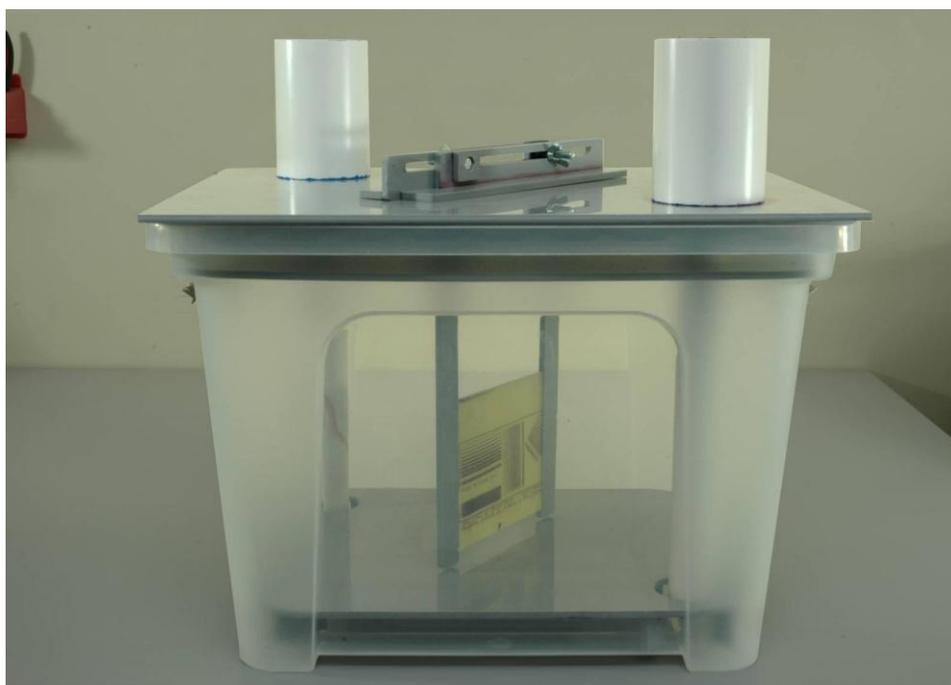


Рис. 2.5. Простейший ротаспрей роторного типа

Помимо хлорного железа могут быть применены и другие травильные растворы, например:

- медного купороса с хлоридом натрия;
- персульфата аммония;
- персульфата натрия;
- перекиси водорода в соляной кислоте.

После травления заготовка должна быть промыта под струей теплой воды.

7 этап. Удаление рисунка

Для удаления рисунка с поверхности заготовки печатной платы может быть применено любое органическое обезжиривающее средство, чаще всего ацетон. В редких случаях требуется применение мягких абразивных средств.

8 этап. Лужение заготовки

Лужение заготовки необходимо для защиты медного слоя печатной платы от коррозии. Как правило, заготовки лудят припоем ПОС-61 (или ПОС-61 со сплавом Вуда в пропорции 1:1) обычным ручным паяльником. В качестве флюса лучше использовать слабоактивные водорастворимые средства такие, как глицерин гидразин или глицерин медицинский. Для ускорения процесса лужения могут быть применены специальные жала с увеличенной площадью поверхность, например, жало «микроволна» или «скошенный цилиндр» (рис. 2.6),



Рис. 2.6. Паяльное жало типа «микроволна» (слева) и «скошенный цилиндр» (справа)

либо часто используемая в радиолюбительской практике «швабра» – обычное медное жало, обмотанное оплеткой для удаления припоя. Также допустимо лужение легкоплавкими припоями, например, сплавом Розе (ПОСВ-50, температура плавления +94 °С) методом окунания: в нагревательную ёмкость помещается расплав, залитый сверху слабоактивным флюсом (глицерином); предварительно обезжиренная заготовка окунается

в расплав, после чего излишки расплава быстро смахиваются силиконовым ракелем обратно в ёмкость.

9 этап. Сверление отверстий

Сверление отверстий для монтажа выводных компонентов, а также переходных отверстий осуществляется с помощью сверлильного станка (ручного или ЧПУ), реже ручной микродрелью.

10 этап. Обрезка заготовки

На данном этапе заготовка обрезается по размерам печатной платы. Обрезка может быть выполнена как на фрезерном станке (ручном или с ЧПУ), так и вручную, например, с помощью ножовки или ножниц по металлу. Пример платы, созданной по технологии термопереноса, представлен на рис. 2.7.

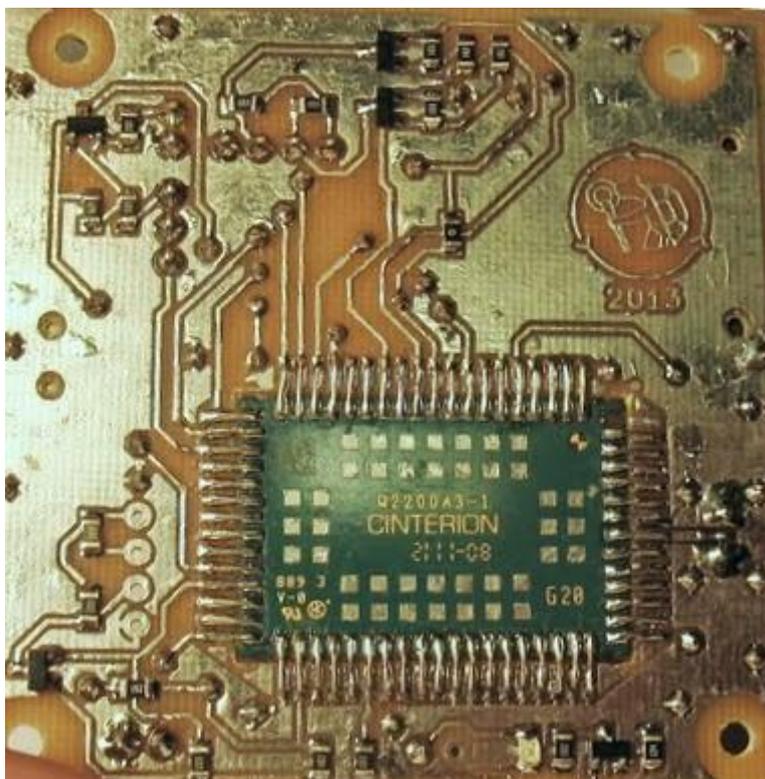


Рис. 2.7. Пример установки GSM модуля CINTERION BGS2 на плату, изготовленную по методу ЛУТ (фото с сайта we.easyelectronics.ru, пользователь Sicorski)

Использование фоторезиста

Фоторезист – полимерный светочувствительный материал, позволяющий получать твердый отпечаток дорожек печатной платы по предварительно созданному многоцветному фотошаблону. Данной технологии присущи наибольшая из всех вышеперечисленных повторяемость и точность

(возможно создание печатных плат с толщиной дорожек и расстоянием между ними от 0,1 мм), а также наименьший процент брака, что позволяет применять ее в мелкосерийном производстве с объемом выпуска до нескольких квадратных метров готовых печатных плат в месяц.

Рассмотрим основные этапы производства печатной платы с применением фоторезиста.

1 этап. Подготовка рисунка печатной платы

Данный этап практически не отличается от такового для предыдущей технологии за исключением того факта, что существуют два основных типа фоторезиста: позитивный, когда печать может осуществляться напрямую из САПР-пакета или графической программы и негативный, когда требуется предварительно инвертировать цвета.

2 этап. Печать

Как правило, рисунок печатной платы распечатывается на прозрачной пленке с применением струйной технологии. Допустимо использования лазерной технологии, но оптическая плотность подобных отпечатков значительно ниже, что может негативно сказаться на качестве готовой продукции¹¹.

Если планируется крупная серия, фотошаблон может быть заказан в типографии, предоставляющей услуги по фотовыводу на пленку. При этом достигается наивысшая оптическая плотность закрашиваемых участков шаблона.

3 этап. Подготовка заготовки из фольгированного стеклотекстолита

Последовательность действий на данном этапе точно такая же, как и для предыдущей технологии.

Этапы с 4 по 6 должны производиться в затемненном помещении с источником так называемого «красного света», то есть необходимо создать условия такие же, как в фотолаборатории.

4 этап. Нанесение фоторезиста

На сегодняшний день фоторезист выпускается в двух основных формах: жидкий в виде спрея и сухой пленочный. Оба имеют свои достоинства и недостатки. Жидкий фоторезист легко наносится на поверхность

¹¹ Для повышения качества фотошаблонов могут быть применены специальные химические средства увеличения оптической плотности тонера (Density Toner).

заготовки, но очень сложно добиться равномерного нанесения. Хорошие результаты дает использование специальной центрифуги, что требует дополнительных затрат на ее приобретение или изготовление. Сухой пленочный фоторезист не имеет этого недостатка, но его гораздо сложнее нанести. Самый простой способ – нанесение пленочного фоторезиста на предварительно увлажненную заготовку с помощью термопресса, термовала, пленочного ламинатора или бытового утюга.

На данном этапе обязателен промежуточный контроль получившихся заготовок на предмет плохого прилегания пленочного фоторезиста к поверхности фольгированного стеклотекстолита из-за образования пузырьков воздуха. Все найденные дефекты должны быть по возможности исправлены (допускается прокалывание «пузырей» тонким острым предметом с повторной обработкой заготовки на термопрессе или ламинаторе). Если устранить дефекты полностью не удастся, то заготовка отбраковывается.

5 этап. Экспонирование (засветка) заготовки

На данном этапе подготовленная заготовка должна быть засвечена ультрафиолетовым светом по распечатанному ранее шаблону. Для этого необходимо плотно прижать фотошаблон к заготовке. Как правило, используются два стекла, плотно сжимающие их между собой. Стекло должно пропускать свет в рекомендованном производителем фоторезиста диапазоне длин волн, оптимальным вариантом является кварцевое стекло. В качестве источников ультрафиолетового света могут быть использованы точечные источники (специальные лампы ультрафиолетового свечения, например, бактерицидные лампы ДРБ или лампы типа ДРШ-250 и ДРТ-250, либо горелки осветительных ламп ДРЛ) с коллиматором (лучший вариант) или без, а также матрицы ультрафиолетовых светодиодов. Время экспозиции зависит от марки фоторезиста и используемого источника излучения, определяется экспериментальным путем.

6 этап. Проявка

В процессе проявки растворяются незасвеченные участки фоторезиста. Проявка осуществляется в щелочном растворе КОН или NaOH с концентрацией 5–7 г/литр. Раствор должен быть комнатной температуры, решающую роль играет не столько сама температура, сколько ее стабильность в процессе проявки. После проявки заготовка промывается под струей теплой воды.

Остальные этапы (травление, удаление рисунка и другие) полностью повторяют таковые для метода термопереноса.

Следует отметить, что помимо фоторезиста существуют и другие фотоотверждаемые полимеры, с помощью которых на поверхность печатаной платы можно наносить паяльную маску или шелкографию, при этом используется та же технология.

Фрезерование печатных плат

Данный способ является самым сложным в реализации, так как требует наличия специального высокоточного оборудования и инструмента. Тем не менее, данная технология достаточно часто применяется в условиях единичного и мелкосерийного производства, и тому есть три причины:

1. Процесс фрезерования печатных плат предполагает высокую степень автоматизации производства.
2. Применение данной технологии позволяет отказаться от использования токсичных химических реактивов, применение которых требует соблюдения дополнительных мер безопасности и более высокой квалификации персонала.
3. В процессе фрезерования фольгированного стеклотекстолита требуется снятие очень тонкого слоя (порядка 30–50 мкм) достаточно мягкого материала, благодаря чему увеличивается срок службы инструмента.

Фрезерования печатных плат мало чем отличается от фрезерования других материалов. Именно поэтому производство может быть организовано на том оборудовании (например, металлорежущих фрезерных станках с ЧПУ), которое уже имеется на предприятии, конечно, при условии, что точность данного оборудования удовлетворяет требованиям, предъявляемым к производимым печатным платам. Отличается только инструмент. При фрезеровании и сверлении фольгированного стеклотекстолита марок FR3 и FR4 применяется твердосплавной инструмент, позволяющий использовать очень высокие обороты (до 60000–100000 об./мин.). Перечислим основные виды инструмента:

Однозубые фрезы малого диаметра. Позволяют создавать изолированные дорожки толщиной от 80 мкм.



Многозубые фрезы. Позволяют быстро снимать медный слой с больших площадей, например по краям печатной платы.



Специальные фрезы. Используются, например, для полировки или вырезания готовой печатной платы из листа стеклотекстолита.



Гравировальные иглы и фрезы.



Микросверла диаметром от 50 мкм.



ГЛАВА 3

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

3.1 Современные подходы к автоматизации проектирования технологических процессов

Одним из самых трудоемких этапов подготовки производства является технологическая подготовка производства. В попытках снизить затраты ресурсов и времени на технологическую подготовку производства (ТПП) родилось целое направление, целью которого является разработка автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП). Под АСТПП понимается совокупность методов, алгоритмов, программ, математического обеспечения, технических средств и организационных мероприятий, объединенных с целью автоматизированного проектирования технологической подготовки производства.

В мировой практике задачам автоматизации ТПП отводится не очень большое значение, что отражается в виде соответствия между российским термином АСТПП и его аналогом САМ (англ. *Computer Aided Design*). Несмотря на то, что их приравнивают, имеются существенные различия с точки зрения их применения. АСТПП включает в себя как системы класса САМ, так и ряд других систем, средств, методов и т. п. В результате направления автоматизации ТПП в России отличается от зарубежных. Так в 80-е годы [11] были определены основные методы проектирования технологических процессов, которые разделены на 3 группы (рис. 3.1):

- Метод адресации к унифицированным (типовым или групповым) технологическим процессам.
- Метод синтеза технологических процессов.
- Поиск детали аналога и заимствование процесса на деталь-аналог.

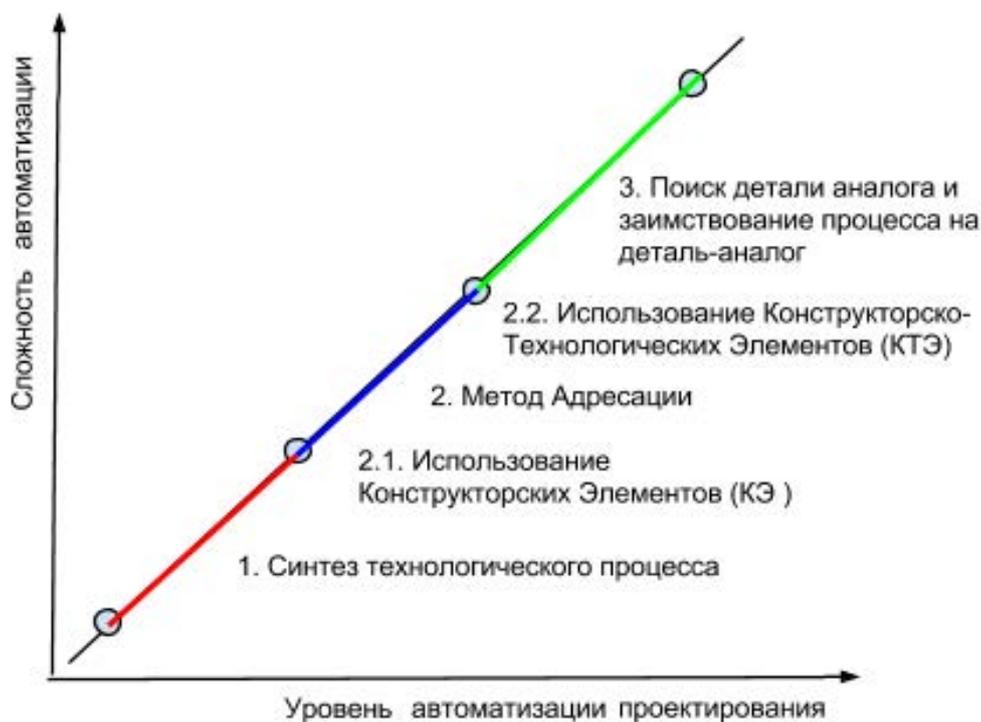


Рис. 3.1. основные методы проектирования технологических процессов

Минимальный уровень автоматизации (а в большинстве случаев автоматизация ТПП в данном виде отсутствует) при синтезе технологического процесса. В этом случае выполняется проектирование «с нуля», что требует достаточно много времени.

Метод адресации основывается на использовании групповой детали, которая включает все те элементы рассматриваемой детали. За счет того, что на групповую деталь имеется сформированный технологический процесс, может быть произведен ее разбор с последующим выбором тех элементов, которые нужны для рассматриваемой детали, что позволит «собрать» новый технологический процесс по частям. В первую очередь такой подход применим для деталей типа «тело вращения», так как для других типов деталей появляется множество побочных связей, резко снижающих эффективность данного метода. Метод активно развивался в 80-е годы параллельно с внедрением групповой технологии на предприятиях СССР. В настоящее время групповая технология используется редко и разработка групповых деталей целесообразна только для решения специализированных задач.

В 80-е годы наравне с групповой технологией развивалась теория о конструкторско-технологических элементах (КТЭ), которые являются частью детали, но при этом представляют собой законченную конструкцию с зафиксированной технологией производства. Такая конструкция яв-

ляется конструкционным элементом (КЭ), содержащим в себе примитивы (элементы в виде цилиндров, конусов, сфер и т.п.) и связи между ними. В отличие от групповой технологии, где при удалении части элементов теряются связи между ними и нарушается целостность информации, при использовании КТЭ возникают новые связи, которые описываются отношениями между элементами. В результате такой подход может использоваться для создания более корректных технологических процессов. Аналогичным образом могут формироваться не только тела вращения, но и другие типы деталей.

Использование деталей-аналогов представляет собой следующую ступень автоматизации, так как при наличии полного аналога позволяет заимствовать технологический процесс без изменений.

Высокая сложность такого вида автоматизации связана со следующими особенностями:

1. Автоматизированный анализ новых проектов и существующих изделий вызывает ряд трудностей, которые в первую очередь связаны с анализом геометрии различных деталей.
2. Критерии сравнения различных деталей имеют эмпирический характер, что требует как привлечения специалистов, так и формирования баз знаний на основе правил сравнения аналогов и определения степени их подобия.
3. Задача адаптации технологического процесса для использования на новой детали в случае наличия неполного аналога является достаточно сложной и мало поддается автоматизации.

Метод заимствования технологического процесса целиком или отдельных его операций от деталей-аналогов тем эффективнее, чем больше база существующих изделий и чем подробнее они описаны. Поэтому особую актуальность данный метод получает в условиях расширенного предприятия, которое сейчас активно развивается в виде виртуальных предприятий и промышленных кластеров. За счет объединения баз в единой информационной среде появляются обширные возможности по анализу проектов и соотнесения их с уже созданными изделиями.

Разработка современных систем класса АСТП с механизмами геометрического анализа должна базироваться либо на использовании КТЭ, либо на использовании деталей-аналогов, либо на комбинации этих методов.

САМ-системы включают в себя средства автоматизации, базирующиеся на сочетании метода адресации и метода синтеза. Однако их функционал ограничивается небольшим набором КТЭ, с соответствующими программами, которые достаточно хорошо оптимизированы. Для большинства остальных поверхностей генерируется программа, качество которой напрямую зависит от качества базы знаний и программного решателя, заложенных разработчиком в САМ-систему.

В общем случае синтез технологического процесса в автоматическом режиме является нетривиальной задачей, решение которой требует как развитого искусственного интеллекта с крупной базой данных и знаний, так и больших вычислительных ресурсов. Результат работы такой вычислительной системы будет далек от оптимального и может применяться только в условиях изготовления принципиально новых изделий в сжатые сроки без возможности использования аналогов или КТЭ.

3.2 АСТПП и CALS-подход

Использование конструкторско-технологических элементов или подбор аналогов требует как наличия базы данных, соответствующей сложности решаемых задач, так и анализа и учета трехмерной геометрии детали, поэтому важно иметь адекватную модель представления геометрических данных. В CALS-подходе (Computer-Aided Acquisition and Lifecycle Support – «Поддержка Непрерывных Поставок и Жизненного Цикла»), которому в России соответствует понятие ИПИ (Информационная Поддержка жизненного цикла Изделий) в качестве основы описания данных об изделии выступает стандарт STEP (STandard for Exchange of Product model data – Стандарт обмена данными модели изделия), основанный базирующийся на языке EXPRESS. В связи с международным статусом CALS и государственным предписании на использования ИПИ в проектировании и производстве следует рассматривать возможности, которые закладываются в соответствии со стандартом STEP, в качестве отправных для автоматизированного анализа.

Формат STEP имеет в своем составе ряд специализированных форматов для различных областей применения [12–14]. Для удобства обработки модели и документирования, внутренняя структура формата построена на основе объектно-ориентированного подхода с использованием специализированного языка EXPRESS, который предназначен для формального выражения концепта в независимости от области применения. Таким обра-

зом, описания концептуальных схем данных, выполненные средствами этого языка, являются онтологиями.

Независимость EXPRESS от предметной области достигается за счёт того, что для представления объекта применяется не специфическое, а обобщенное понятие «сущность» (ENTITY). Каждая сущность обладает атрибутами, выражающими характерные свойства моделируемого объекта. Например, сущность геометрическая точка имеет атрибуты, отражающие координаты этой точки в пространстве, а сущность изделие имеет атрибуты, отображающие обозначение, наименование изделия и т. д. Таким образом, EXPRESS является языком задания информационных моделей, а сущность представляет собой основной элемент модели STEP.

Кроме перечисленных особенностей, важным атрибутом данного формата является его стандартизация, т. е. соответствие международному стандарту ISO 10303 STEP (или его аналог ГОСТ Р ИСО 10303-2002). Статус Международного стандарта обеспечивает два очень важных свойства STEP – стабильность (стандарт пересматривается примерно один раз в пять лет, и новые версии дополняют старые, не внося изменений и не отменяя уже имеющиеся правила) и общедоступность (необходимые материалы практического назначения находятся в свободном доступе или могут быть приобретены в официальных органах стандартизации).

В основу проекта STEP (Стандарт STEP ISO 10303) положено утверждение о том, что информация об изделии используется на всех этапах жизненного цикла. Поэтому для обмена информацией возможны два варианта построения взаимодействий – непосредственный обмен между приложениями и обмен данными через «нейтральный» стандарт. STEP задаёт полную информационную модель изделия на протяжении его жизненного цикла, а также различные виды обмена данными в структурированном компьютерном виде, который не зависит от используемых средств или программных продуктов [15]. Безусловным преимуществом такого подхода является возможность организации упрощённого информационного обмена между всеми компьютерными системами, используемыми на протяжении ЖЦИ.

Уже на ранних стадиях разработки в необходимые атрибуты формата входили:

- гибкость (наличие возможности расширения существующих частей стандарта без потери им законной силы);
- строго формализованная документация;
- эффективность обработки, обмена и хранения;

- описание всевозможных данных;
- минимальный набор элементов;
- смысловое разделение данных;
- логическая классификация элементов данных;
- совместимость с другими форматами, с которыми имеется связь.

В соответствии с этим было решено, что ядро модели должно включать геометрию, граничное представление, трёхмерные твердотельную и поверхностную модели, допуски, параметрические особенности изделия, а также синтаксис данных и структуру файла, независимую от вышеупомянутого содержания.

Применение такого подхода к описанию данных позволяет хранить «разностороннюю» информацию об изделии. Язык описания позволяет представлять конструкторско-технологические параметры в связке с геометрическими элементами.

Такая структура формата обеспечивает достаточный уровень формализации в представлении элементов трехмерной модели, что делает его наиболее подходящим для осуществления геометрического анализа. Сравнение деталей включает в себя:

- Геометрический анализ, позволяющий оценить степень схожести конструкции сравниваемых деталей. Данный тип анализа имеет ключевое значение, так как в большинстве случаев для изделий с одинаковой конструкцией может быть произведено заимствование технологического процесса с минимальными изменениями.
- Анализ требований к детали, включающий анализ материала изделий. Такие требования представляются как атрибуты деталей и могут быть непосредственно сравнены с последующим определением различий и степени их важности.
- Анализ такого описания детали, которое не может быть достаточно полно формализовано для проведения прямого сравнения.

Из представленных видов геометрический анализ деталей является ключевым, так как при установлении сходства деталей в зависимости от других аспектов возможно либо полное заимствование технологического процесса, либо частичное, что в любом случае упрощает дальнейшую подготовку производства. Сравнение геометрии деталей более сложная задача, нежели чем сравнение, например, материала из которого производится изделие. Связано это с проблемами в формализации геометрии детали.

Одним из подходов, позволяющих формализовать данные о геометрии, является формирование параметрической модели изделия. В такой модели между всеми элементами строго определена связь, зафиксированная в виде однозначным образом описанных параметров. Возможно два варианта формирования параметрической модели детали – создание параметрической модели при проектировании детали и преобразование трехмерной модели в параметрическую модель в автоматическом или ручном режиме.

3.2.1 Параметрическое моделирование и КТЭ

Наиболее полного описания геометрии изделия в виде набора характеристик и взаимосвязей можно добиться за счет параметрического моделирования, которое определяет первый элемент при проектировании, а также все последующие элементы и их взаимосвязи в виде формул или параметров. Таким образом, становится возможным не только оценить идентичность геометрии двух деталей, но и определить насколько они отличаются и при наличии соответствующей базы знаний оценить критичность таких отличий для конкретного случая. Также параметрическое моделирование позволяет производить манипуляции с трехмерной моделью и отрабатывать различные модификации конструкции за счет смены нескольких параметров.

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трёхмерного моделирования. Конструктор в случае параметрического проектирования создаёт математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

Идея параметрического моделирования появилась ещё на ранних этапах развития САПР, но долгое время не могла быть реализована из-за недостаточной компьютерной производительности. История параметрического моделирования началась в 1989 году, когда появились первые САПР с возможностью параметризации.

Трёхмерное параметрическое моделирование является гораздо более эффективным (но и более сложным) инструментом, нежели двухмерное параметрическое моделирование. В современных САПР среднего и тяжёлого классов наличие параметрической модели заложено в основу графического ядра САПР.

Примеры САПР, поддерживающие возможность трёхмерного параметрического моделирования:

- ADEM CAD/CAM/CAPP — российская САПР среднего класса.
- CATIA – САПР тяжёлого класса французской фирмы Dassault Systemes.
- NX (Unigraphics) – САПР тяжёлого класса Siemens PLM Software.
- Creo Parametric ранее Pro/Engineer – САПР тяжёлого класса Parametric Technology Corporation (PTC).
- Inventor – САПР среднего класса от Autodesk.
- Solid Edge – САПР среднего класса от Siemens PLM Software.
- SolidWorks – САПР среднего класса SolidWorks Corporation (подразделение Dassault Systemes).
- T-FLEX CAD – российская САПР среднего класса компании Топ Системы, использующая геометрическую параметризацию.
- КОМПАС-3D – российская САПР среднего класса компании АСКОН, созданная на основе собственного ядра геометрического моделирования.

Характерной областью применения параметрического моделирования являются детали, геометрия которых ограничена конструктивными требованиями, а размеры выбираются из стандартов (например, размеры из ряда предпочтительных чисел). Учитывая ограниченное множество возможных модификаций детали, трёхмерная модель может быть собрана на основе шаблонов в САД-системе. Для этого САД-система должна поддерживать применение таких шаблонов и внутренние языки программирования, которые позволяют оперировать с геометрией.

Примером подобного подхода является использование системы CATIA в качестве базы для моделирования деталей типа «тела вращения» на основе набора шаблонов (рис. 3.2).

Каждый из таких шаблонов представляет собой конструкционный элемент, описываемый определенной геометрией и набором характеристик, которые в зависимости от детализации могут включать как размеры, так и технологические параметры. В данном случае конструкционный элемент включает в свой состав описание допусков на размеры и отклонения формы, а также шероховатость поверхностей, заданную параметрически.

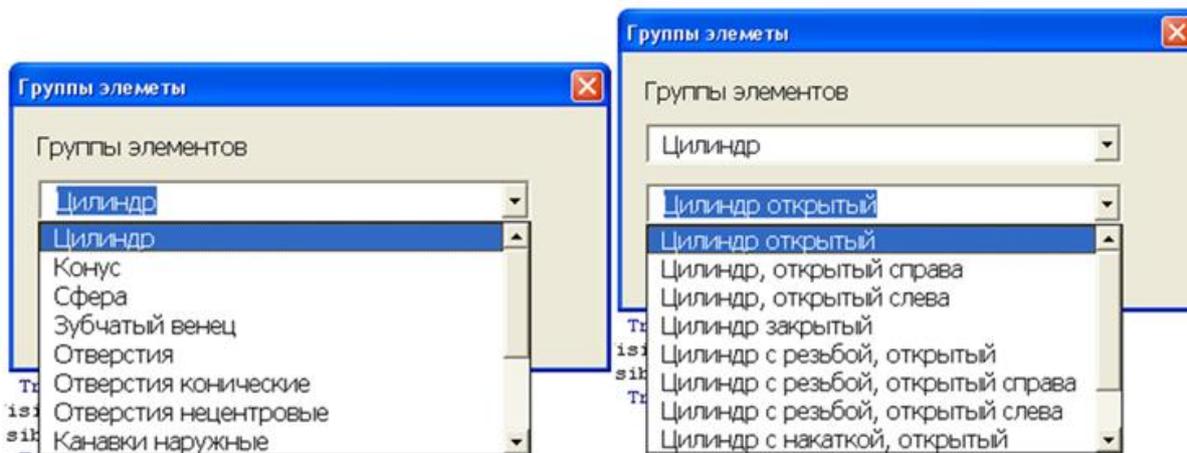
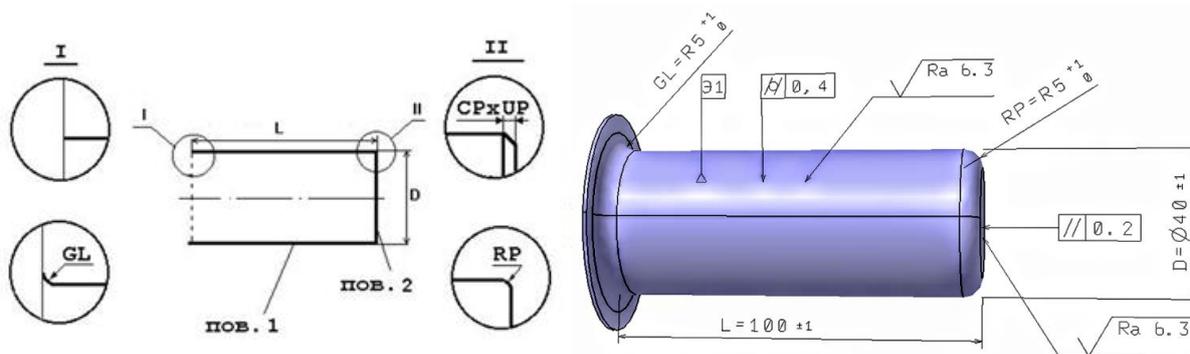


Рис. 3.2. Пример параметрической модели детали типа «тело вращения»

Комбинируя шаблоны можно получать различные виды деталей, которые могут быть сохранены как в виде трехмерных моделей, так и в виде параметрического описания [16]. Ограничением такого подхода является масштабируемость, т. к. работа с описанным типом деталей мало отличается от работы с 2D-объектами из-за отсутствия взаимодействия с третьим измерением модели (за счет симметричности тел вращения достаточно описать сечение, чтобы охарактеризовать полную модель детали). Таким образом, «наращивание» изделия путем добавления элементов по шаблону не может быть использовано для деталей, которые представляют собой более сложные конфигурации, нежели тела вращения.

Другим подходом к параметрическому моделированию является создание геометрии с точки зрения ее трехмерного представления, т. е. подход нацелен на создание моделей максимально привычным образом. Формируется трехмерное представление, которое не может быть однозначно описано сечением. Для тел вращения такой подход также применим, хотя может оказаться более трудоемким, чем в случае использования представленного ранее способа.



Параметрическое трехмерное моделирование базируется на использовании примитивов (цилиндры, сферы, конусы, плоскости) и взаимосвязей между ними. Характерным примером трехмерного моделирования на основе такого подхода является система OpenSCAD [goo.gl/X0qkch].

Данный программный продукт относится к классу систем моделирования полностью параметризованного типа. Формирование тел выполняется строго по описанной в редакторе программе.

Используемый в openSCAD язык является компилируемым и после его компиляции формируется тело, которое затем отображается в окне просмотра, поддерживающего традиционные функции в виде поворота или масштабирования. Для ускорения работы поверхности отображаются в упрощенном (более грубом) виде, но при экспорте могут быть получены детализированные модели.

В процессе работы с системой используется сильно упрощенный язык программирования (уровень языка соответствует скриптовым языкам, применяемым для написания сценариев в САД-системах, офисных приложениях и т. п.). Так, для построения параллелепипеда со сторонами $20 \times 30 \times 40$ пользователю необходимо ввести следующую программную инструкцию:

```
cube([20, 30, 40]);
```

В результате будет сформирован параметрический параллелепипед. Также данная конструкция может быть описана в виде:

```
i = 10;  
j = 2;  
cube([j * i, (j + 1) * i, (j * 2) * i]);
```

Параметры i и j могут меняться, что влечет изменения в конфигурации детали. В процессе построения модели ключевую роль играют булевы операции, которые разделяются на три типа (рис. 3.3):

1. Операция разности ($A - B$) или ($B - A$);
2. Операция объединения ($A \cup B$);

3. Операция пересечения ($A \cap B$).

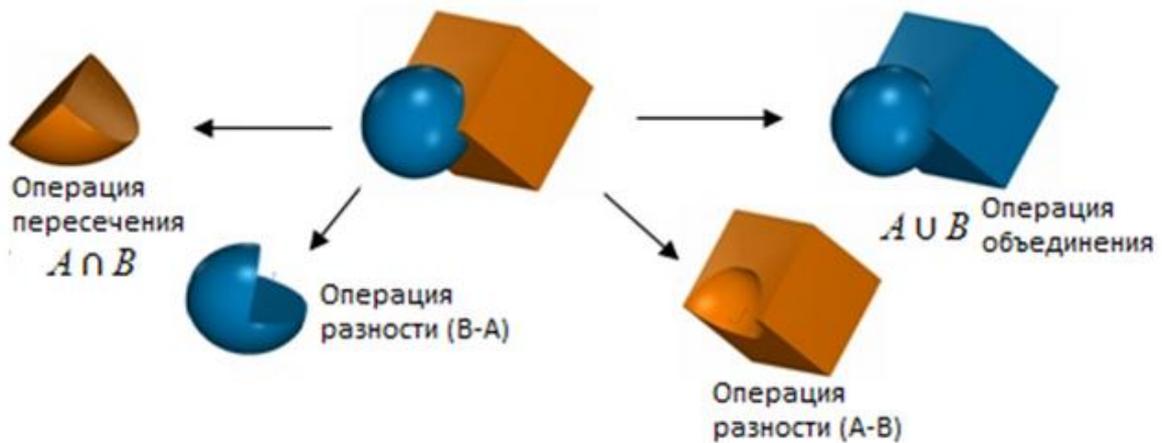


Рис. 3.3. Булевы операции над трехмерными объектами

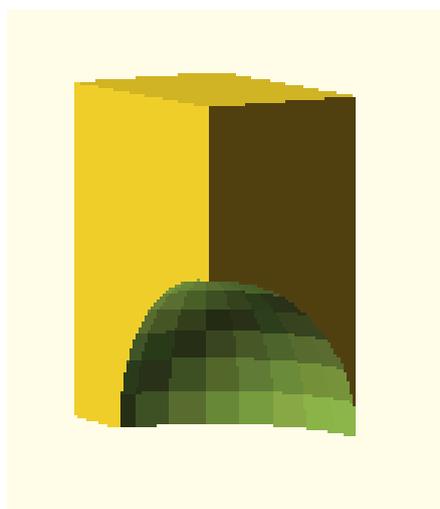
Так операция вычитания сферы из параллелепипеда будет описываться следующим кодом:

```
i = 10;
```

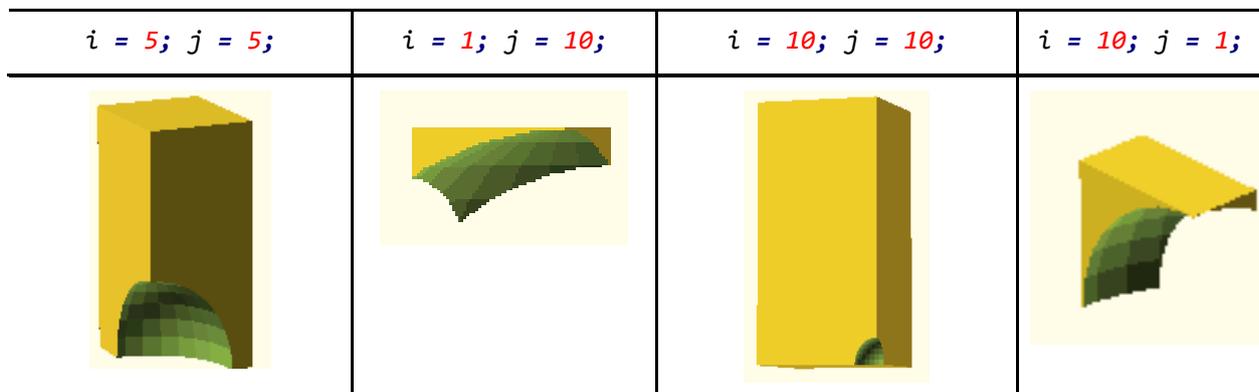
```
j = 2;
```

```
difference() {  
  cube([j * i, (j + 1) * i, (j * 2) * i]);  
  sphere(20);  
}
```

И изображаться, как показано на рисунке.



В зависимости от параметров возможна различная картина финальной детали.



Таким образом, для построения параметрической модели необходимо после формирования первоначального узла конструкции (первого примитива) осуществлять все построения в параметрическом виде. В результате приходится проводить дополнительные расчеты, которых может потребоваться больше чем в традиционных системах трехмерного моделирования. Также большинству пользователей может быть неудобно строить модели через текстовое окно и задавать зависимости. Такой интерфейс построения моделей будет неинтуитивным для новых пользователей, что может их отпугнуть от освоения системы.

Третий подход к созданию параметрических моделей сочетает в себе и два предыдущих и современные средства трехмерного моделирования. Основная его суть в использовании примитивов для построения конструктивных элементов, которые и формируют трехмерную модель. Каждый конструктивный элемент представляет собой набор примитивов и связей между ними, а параметрическая модель является конструктивным элементом верхнего уровня, так как состоит из более простых элементов и связей между ними (рис. 3.4).

Основой представленной модели являются два вида примитивов (плоскости и цилиндры), комбинация которых с использованием булевых операций позволяет получать различные элементы, включая массивы отверстий и пазы. Каждый из таких примитивов обладает рядом уникальных параметров (рис. 3.4).

Для реализации параметрической системы моделирования использовалась САД-система FreeCAD. Работа с примитивами включает в себя выбор отправной точки для начала моделирования, что позволяет строить модель, не привязываясь к точным координатам, а в более свободном и упрощенном стиле. Непосредственно через меню параметрического модуля доступны булевы операции, углы построения, основные параметры и начальная точка, если она не была задана иначе (рис. 3.5).

Полная модель изделия может быть создана как с использованием примитивов, так и с использованием КЭ. Для этого после объединения двух или более примитивов они сохраняются в виде конструкторского элемента, который описывается сгенерированным изображением, характеристиками и наименованием. После создания всех КЭ необходимых для модели и выбора недостающих из сформированной базы, можно приступить к созданию полной (комплексной) модели детали. Процесс создания такой модели включает последовательный выбор отдельных КЭ и задание связей, которые могут выражаться в виде взаимного расположения (задаваемого вручную или через графическое окно), либо в виде булевого отношения, которое в большинстве случаев (обычно при моделировании ограничиваются двумя типами булевых операций) определяет будет ли новый КЭ добавляться к создаваемому телу или вычитаться из него.

Одним из принципиальных направлений использования метода параметрического моделирования на основе КЭ является создание конструкторско-технологической модели (КТМ) детали.

Для осуществления параллельной конструкторско-технологической подготовки производства необходимо наличие базы знаний, которая в первую очередь должна содержать описание способов получения определенного конструкционного элемента. В качестве такого КЭ с технологическим описанием используется КТЭ. При этом как двум-трем примитивам могут соответствовать десятки КЭ, так и одному КЭ соответствуют разные КТЭ в зависимости от способа получения определенных поверхностей. Например, КЭ в виде ступенчатого вала может быть получен как с использованием токарного станка, так и с использованием фрезерного.

Для полноценного функционирования конструкторско-технологической системы моделирования нацеленной на формирование КТМ в ее составе должны быть структурированные библиотеки хранящие данные об КЭ, КТЭ и КТМ, базы знаний и специализированные модули, оперирующие такой информацией.

При использовании такой системы выполняется объединение двух основных подходов к проектированию ТП. Технологический процесс синтезируется из отдельных частей (роль частей выполняют КТЭ), которые формируются на основе подбора аналогий из базы данных. Основная суть синтеза состоит в подборе подходящих друг другу КТЭ и оптимизации полученного технологического процесса путем перебора различных вариаций. Данный процесс представлен на рис. 3.6.

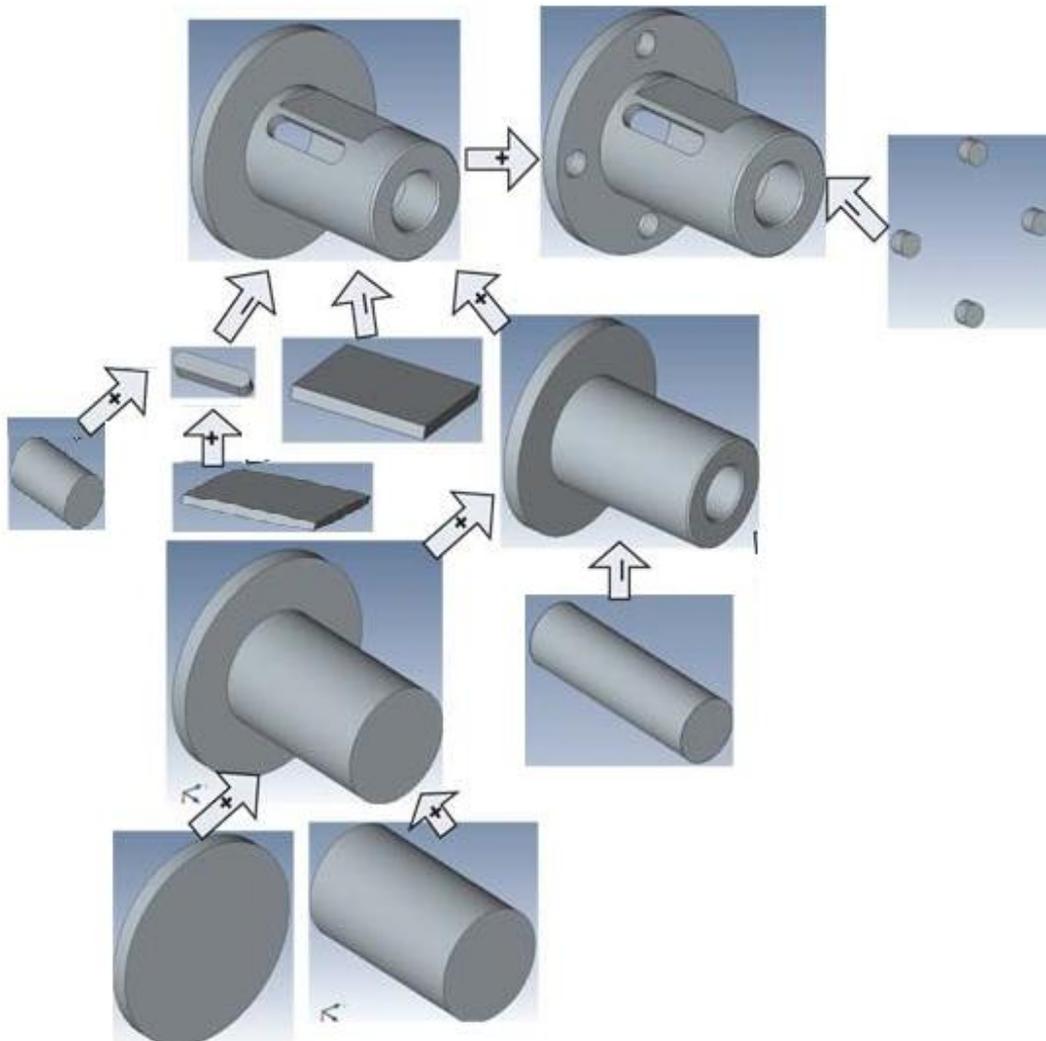


Рис. 3.4. Формирование КМ на основе стандартных примитивов и их групп

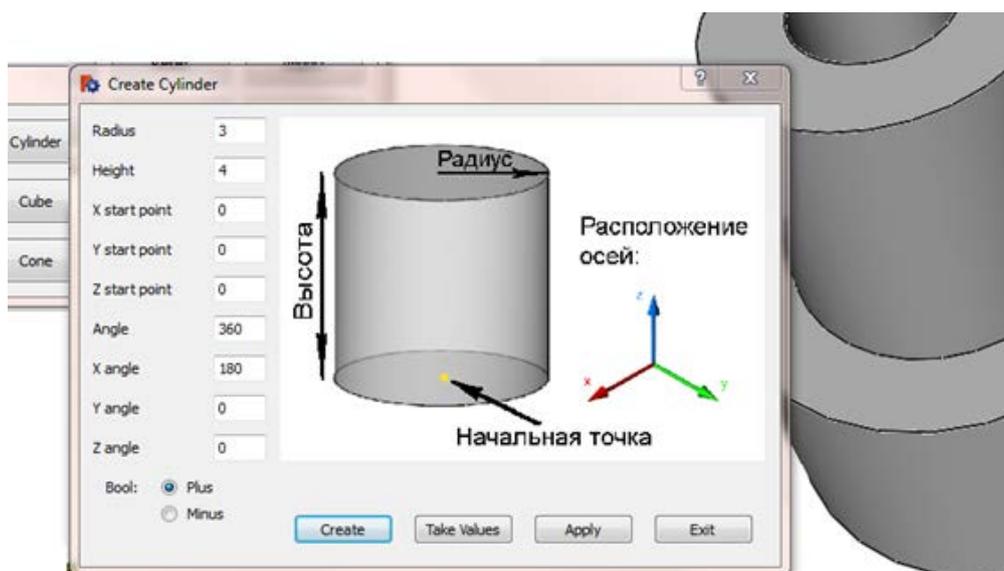


Рис. 3.5. Окно создания и редактирования примитива «Цилиндр»

3.2.2 Анализ геометрии изделия на основе STEP и трехмерных аннотаций

Несмотря на явные преимущества параметрических моделей изделий, они распространены пока недостаточно сильно, что связано с необходимостью дополнительного обучения конструкторов. В связи с этим подавляющее большинство трехмерных моделей не являются параметрическими.

Схема синтеза изделия и техпроцесса

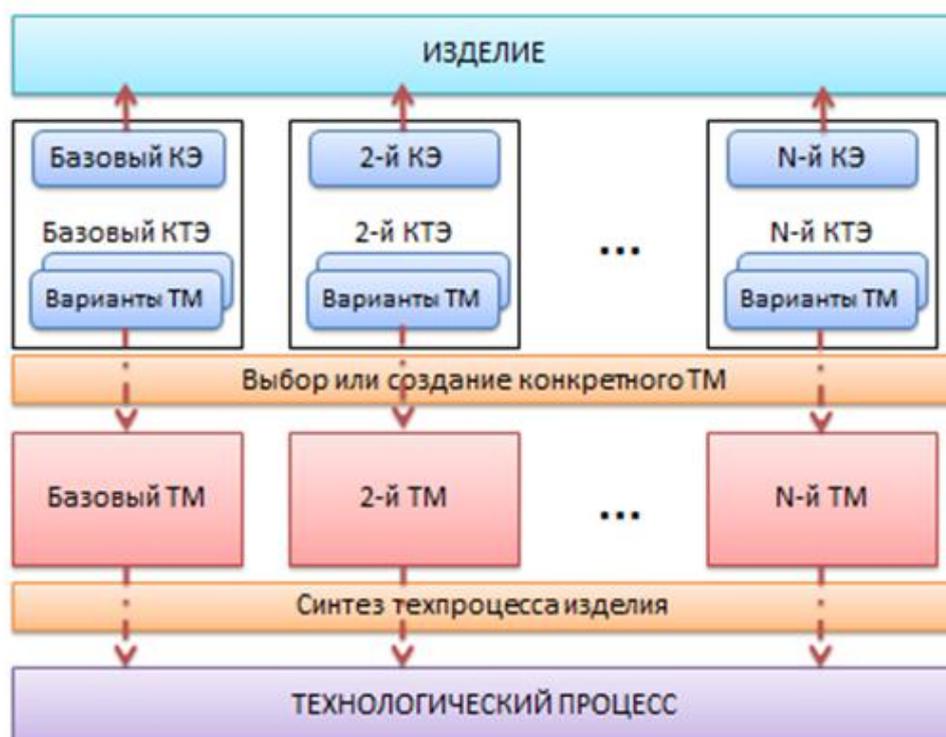


Рис. 3.6. Схема синтеза изделия и ТП

Даже активное внедрение параметрического моделирования потребуют десятки лет для перехода к новому подходу. В связи с этим необходимо наличие специализированных инструментов или средств для преобразования существующих моделей в параметрический вид. Трехмерные модели, которые будут анализироваться, должны соответствовать таким требованиям, как открытость, стандартизируемость и структурированность. Под открытостью здесь понимается возможность свободного доступа к внутренней информации в трехмерной модели и всем описаниям геометрических элементов.

Этому критерию не соответствует большинство форматов, используемых в коммерческих CAD-системах, таких как CATIA («CATPart») или

SolidWorks («.sldwt»). Под стандартизируемостью подразумевается использование такого формата трехмерных моделей, который хорошо описан, является стандартным для подавляющего большинства систем трехмерного моделирования и имеет регламенты международного использования.

Таким образом, новые форматы трехмерных моделей хоть и имеют перспективы с точки зрения полноты описания всех необходимых характеристик, но не подходят для анализа уже накопленных баз моделей и не могут быть достаточно оперативно внедрены в используемые системы трехмерного моделирования. Требование по структурированности является важным с точки зрения процесса анализа трехмерных моделей, так как позволит осуществлять обработку информации в разумные сроки без привлечения математического аппарата высокой сложности и с использованием минимальных вычислительных ресурсов.

Данное требование не позволяет применять трехмерные модели формата «.stl», так как при сохранении моделей в данный формат производится построение полигональных поверхностей из набора точек, автоматическое преобразование которых в примитивы является задачей высокой сложности и зачастую не может быть произведено без режима диалога с участием пользователя.

Представленным требованиям в полной мере соответствуют форматы IGES и STEP. Последний пришел в 90-х годах прошлого века на смену устаревшему IGES.

Трехмерная модель в формате «.stp» содержит внутри своей структуры примитивы различного типа, которые соответствуют следующей классификации:

1. примитивы первого уровня (точка, линия);
2. примитивы второго уровня (плоскость, окружность, эллипс);
3. примитивы третьего уровня (цилиндры, конуса, параллелепипеды, сферы);
4. переходные примитивы (скругления);
5. комбинация примитивов третьего уровня;
6. параболы, гиперболы и т. п.;
7. поверхности свободной формы;
8. 3dMesh – ячейки (используемые при трёхмерном сканировании изделий и т. п.).

Синтаксический разбор структуры трехмерной модели в формате «.str» позволяет разбить все существующие в ней сущности на ряд типов, часть из которых описывает геометрию. Так имеются такие сущности, как:

- «CARTESIAN_POINT» – точка в декартовой системе отсчета;
- «DIRECTION» – направление;
- «AXIS2_PLACEMENT_3D» – положение осей координат;
- «CONICAL_SURFACE» – коническая поверхность;
- «CIRCLE» – элемент, характеризующий окружность.

Кроме них выделяются также комплексные сущности, ссылающиеся на представленные ранее:

- «CYLINDRICAL_SURFACE» – цилиндрическая поверхность;
- «LINE» – элемент, характеризующий линию;
- «PLANE» – элемент, характеризующий плоскость.

Внутренние связи трехмерной модели могут быть проиллюстрированы на рис. 3.7.¹²

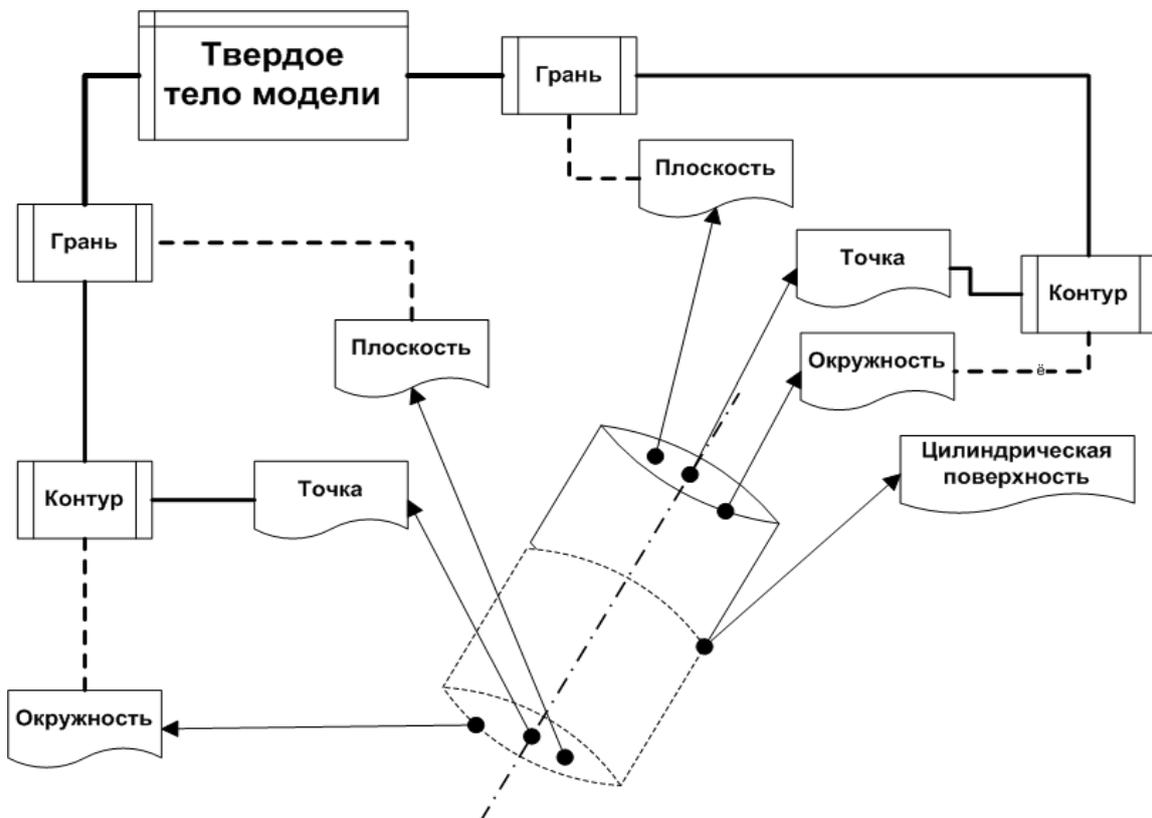


Рис. 3.7. Связь сущностей и геометрического представления модели

¹² Подробное описание структуры геометрической модели формата .str представлено в прил. 3.

Грибовским А. А. предложен метод последовательного синтаксического разбора трехмерной модели, в результате которого может быть сформирован массив всех примитивов нижнего уровня, анализ которого уже позволит постепенно определить перечень всех примитивов в модели и их взаимосвязей. В результате анализа формируются таблицы описания примитивов.

Основное затруднение при формировании КТЭ на основе трехмерных моделей возникает из-за ограничений в виде отсутствия конкретных технологических данных, связанных с геометрической информацией. Недостающие данные можно получать с использованием чертежных данных [17] в цифровом виде, но если для тел вращения из нескольких элементов такой подход вполне уместен, то при увеличении сложности изделия трудоемкость обработки подобных данных увеличивается экспоненциально.

Другим подходом является использование так называемых «трехмерных аннотаций». Само понятие «трехмерная аннотация» (англ. *three dimension annotation*) является условным переводом [18] из стандарта ASME Y14.41-2003, так как аналогичного понятия в русском языке пока нет. Это связано с тем, что стандарт создан и используется в иностранных системах, а в отечественных не применяется. В основном такая ситуация проистекает из малого использования трёхмерных моделей в качестве основного элемента подготовки производства и ограниченной стандартизации самого понятия «трехмерная модель изделия».

ASME Y14.41-2003 и созданный на его основе, более современный ISO 16792-2006, отражают возможности использования трёхмерных аннотаций, их потенциал, а также требования к системам, позволяющие быть уверенным как в корректности представления данных, так и в удобстве работы с ними. Перевод, адаптация и анализ стандарта ISO 16792-2006 позволили выявить ряд ключевых характеристик подхода с использованием трёхмерных аннотаций. Отметим основные особенности применения этого стандарта.

Во-первых, при создании стандарта бралась за основу необходимость в поддержке использования чертежей в связке с трёхмерными моделями. Разработка велась с целью применения существующих требований, используемых для двухмерного представления информации, к результатам трёхмерного моделирования. На протяжении всего срока разработки стан-

дарт проводился контроль документации, необходимый для согласования информации в наборе данных между чертежом и моделью.

Стандарт оперирует такими понятиями [19], как:

- аннотация;
- плоскость аннотации;
- связанные объекты.

На данный момент аннотации представляют собой замену чертежной документации [20] и выполняются в схожем с ней виде. То есть, по аналогии с чертежом, при нанесении аннотаций формируется проекция, содержащая конструкторско-технологическую информацию и привязки к геометрии в виде выносных элементов. Такая проекция называется аннотационной плоскостью, и аннотация целиком располагается в ней. По аналогии с чертежом, в одной плоскости могут располагаться несколько аннотационных элементов. Также, по аналогии, могут создаваться сечения, которые будут служить аннотационными плоскостями для соответствующих элементов (рис. 3.8).

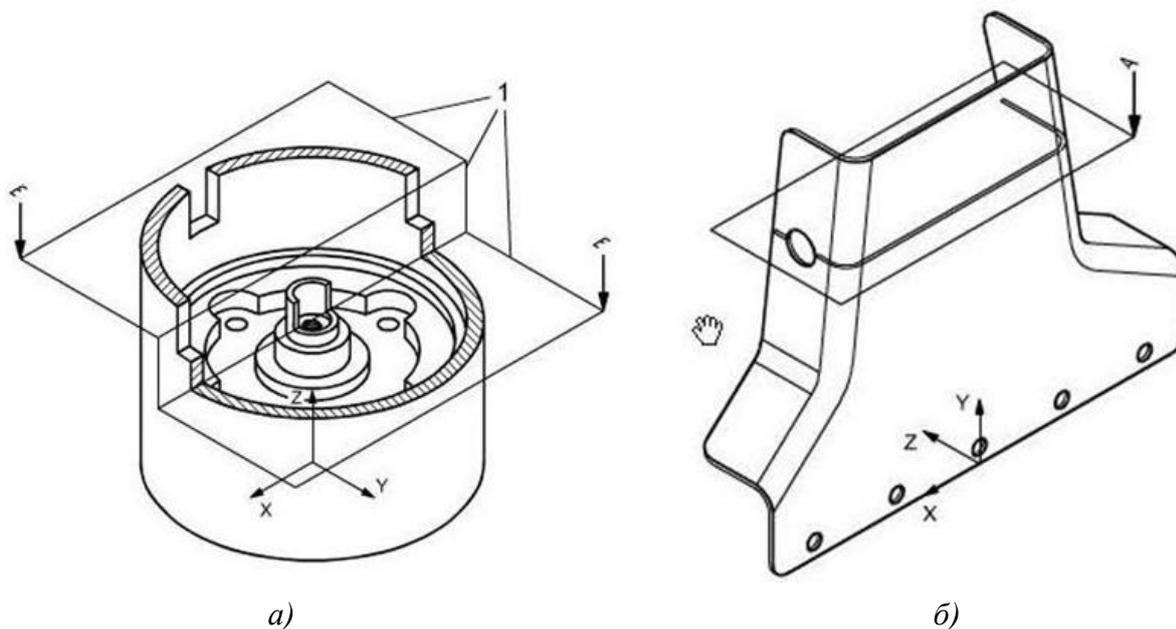


Рис. 3.8. Аннотационные плоскости, привязанные к элементам трёхмерной модели, включая ступенчатые (а) и обычные (б) разрезы

Кроме этого, стандарт включает понятие «сохранённые виды», которое описывает функцию системы трёхмерного моделирования, позволяющую привязывать к ссылкам в дереве модели определённые геометрические

виды в пространстве, имеющие важное значение при подготовке производства, или содержащие элементы, которые требуют повышенного внимания.

Аннотационные плоскости, сечения и сохранённые виды позволяют не только представлять информацию аналогично чертежу, но и значительно упрощают работу всех специалистов, использующих модель изделия.

Другой особенностью подхода с использованием аннотированных моделей, является представление функции фильтрации аннотаций и связанных данных на уровне стандарта. Таким образом, возможность скрывать лишнюю в данный момент информацию для более подробного рассмотрения важных параметров является обязательной для всех систем, поддерживающих использование трёхмерных аннотаций. Так, применение одного из фильтров приводит к отображению только линейных размеров, что упрощает анализ информации, как показано на рис. 3.9.

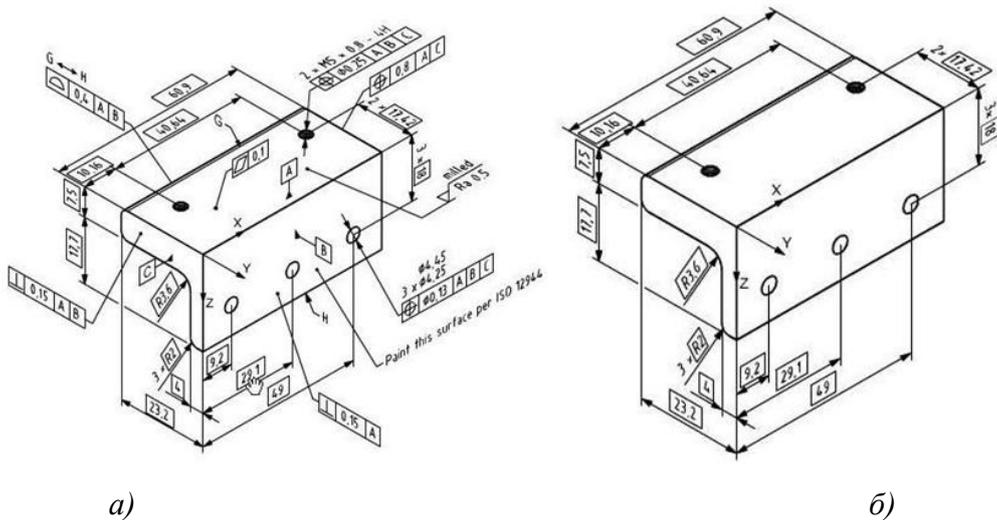


Рис. 3.9. Полное представление аннотаций на модели (а) и представление после применения фильтра по виду аннотаций (б)

Также в стандарте зафиксирована возможность определения привязок к элементу. Например, можно отобразить все цилиндрические элементы, имеющие одинаковый диаметр и лежащие на одной оси (рис. 3.10).

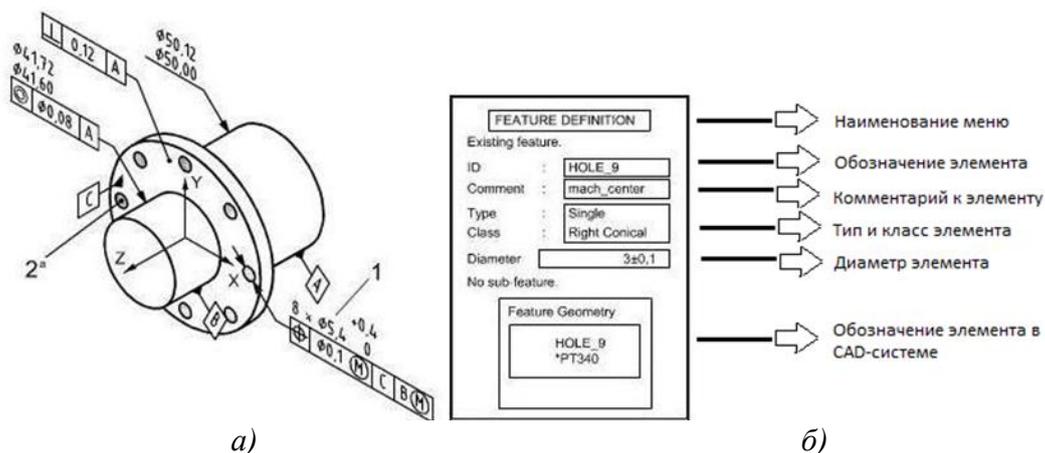


Рис. 3.10. Выделение элементов со схожими параметрами (а) и вывод данных по ним (б)

Использование данной функции аннотаций позволяет выявить все параметры определенного элемента изделия, что значительно упрощает работу пользователя, так как САД-система наглядно демонстрирует требования без необходимости длительного анализа чертежа и выделения всех связанных данных. Могут отражаться как связанные данные, так и связанные элементы, что значительно упрощает процесс подготовки производства.

Кроме функции выделения связанных элементов и параметров, активизирующейся автоматически при выборе какой-либо части модели, стандарт также предусматривает отображение перекрёстных ссылок в модели. При выделении индикатора допуска, индикатор базы и индикатор ссылки на эту базу должны быть подсвечены или указаны каким-либо другим образом среди остальных объектов на экране. Аналогично при выделении индикатора базы, индикаторы ссылки на базу, содержащие одинаковую букву обозначения этой базы, должны быть подсвечены.

Также стандартом регламентируется применение ряда других дополнительных средств, не столь важных, как описанные ранее, но позволяющих ещё больше упростить работу пользователей с трёхмерной моделью изделия. Одним из таких средств является инструмент указания области действия параметра, определённого в аннотации [21]. Пример выбора части плоскости с использованием вспомогательной геометрии представлен на рис. 3.11 а. Аналогично можно указывать участки базирования (рис. 3.11 б).

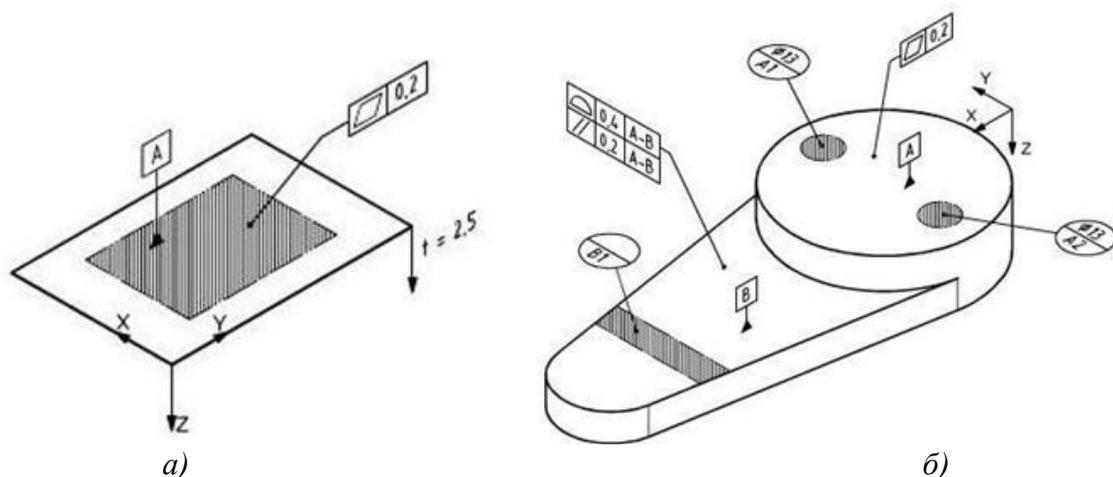


Рис. 3.11. Часть поверхности в качестве базового объекта (а) и привязка участков базирования (б)

Если проводить сравнение чертёжной документации с трёхмерными аннотациями, то в первую очередь оценивается простота восприятия. Данный критерий носит субъективный характер и связывается с привычками

и предпочтениями конкретного человека, а также с подходом к его обучению. Традиционные принципы обучения ориентируются на чертёжное представление данных, поэтому, на данный момент, можно считать, что чертежи проще воспринимаются, так как к этому специалисты готовились еще при изучении соответствующих дисциплин. С другой стороны, сейчас обучение больше нацеливается на использование объёмной геометрии и сопутствующих инструментов.

В результате восприятие информации переносится в трёхмерное пространство. В соответствии с существующими тенденциями можно смело сказать, что переход к представлению конструкторско-технологической информации в объёмном виде, привязанной непосредственно к геометрии модели, произойдёт в течение ближайших лет.

Привязка к существующей геометрии осуществляется не только в виде связей между размерами и элементами, но и в виде их корректного отображения, наглядно демонстрирующего какой параметр к какому элементу относится. С точки зрения привязок оба подхода имеют свои недостатки, так как ни один из них не позволяет напрямую зафиксировать принадлежность определенного параметра к соответствующему элементу конструкции. Однако, если для трёхмерной модели привязка осуществляется напрямую к поверхности, то для чертежей привязки выполняются к одной из проекций. Таким образом, проведение дополнительной обработки информации с использованием сторонних средств или специально разработанных приложений с целью определения связи между элементами изделия и конструкторской информацией значительно упрощается в случае использования трёхмерной модели изделия с аннотациями по сравнению с чертёжной документацией.

Также при работе с информацией важна однозначность восприятия данных, то есть использование чертежа или трёхмерной модели с аннотациями должно упрощать работу и быть максимально понятным. Наличие двусмысленности в трактовке информации может не только существенно усложнить работу, но и привести к неправильному изготовлению изделия. Для чертёжной документации введён ряд правил и стандартов, позволяющих воспринимать информацию как можно легче и адекватнее. Однако отсутствие возможности полного регламентирования всех особенностей построения приводит к появлению различных способов отображения одного и того же элемента на чертеже. Также чертёж чисто физически ограничен в представлении некоторых видов элементов, поэтому необходимо либо

тщательно проверять читабельность чертежа после его создания, либо использовать трёхмерные модели, которые лишены этих недостатков по умолчанию, так как каждый элемент представляется так, как он есть. В связи с этим (несмотря на все возможности чертежей), трёхмерная модель с аннотациями является более наглядным источником информации, практически не допускающим двусмысленности восприятия.

Автоматизированный анализ трехмерных аннотаций, также как и геометрии изделия, требует синтаксического разбора [22]. Результаты анализа трехмерных аннотаций можно разделить на 3 типа (рис. 3.12):

1. Линии привязок аннотации к примитивам.
2. Размерная линия.
3. Трёхмерная аннотация.

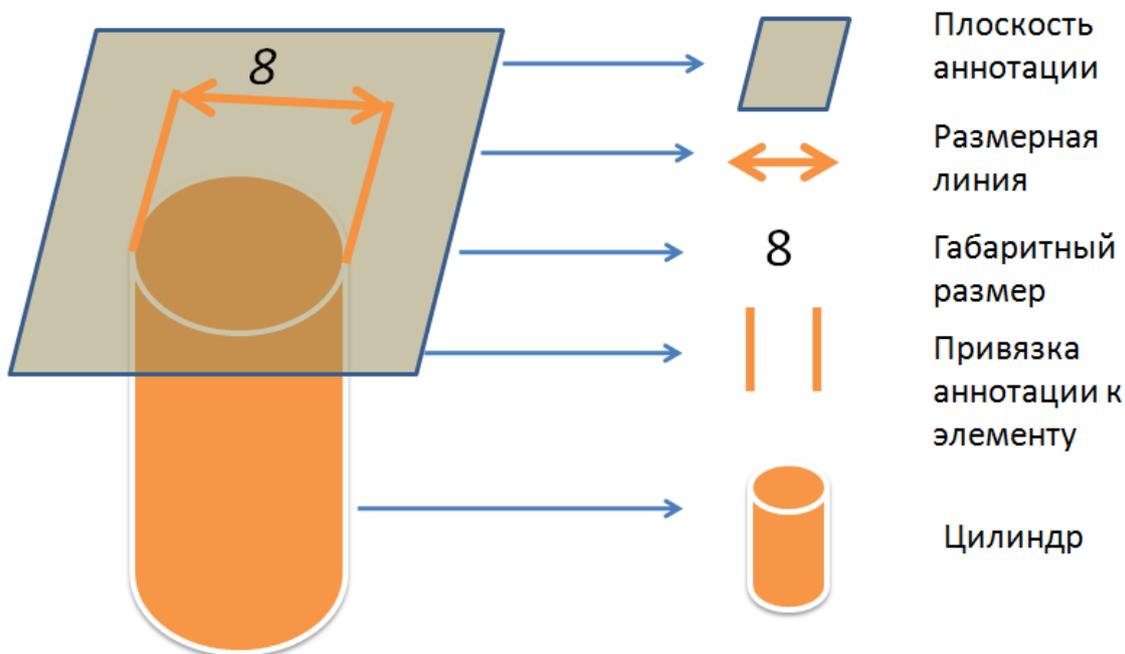


Рис. 3.12. Разбиение модели на наборы сущностей, включая аннотационные данные

Каждая из этих частей представляется в виде набора точек. Линии привязок позволяют оценить, к какому элементу относится конкретная аннотация. Размерная линия не несёт особой информации и может использоваться как вспомогательный элемент для оценки аннотации. Третья часть включает в себя непосредственно данные по параметрам аннотации.

Анализ извлеченных данных, который, в том числе, включает распознавание символов (рис. 3.13), описывающих технологические характеристики, позволяет сформировать КЭ максимально приближенные к КТЭ.

Среди основоположников методик автоматизированного проектирования ТП многие описывали в своих работах подходы к представлению

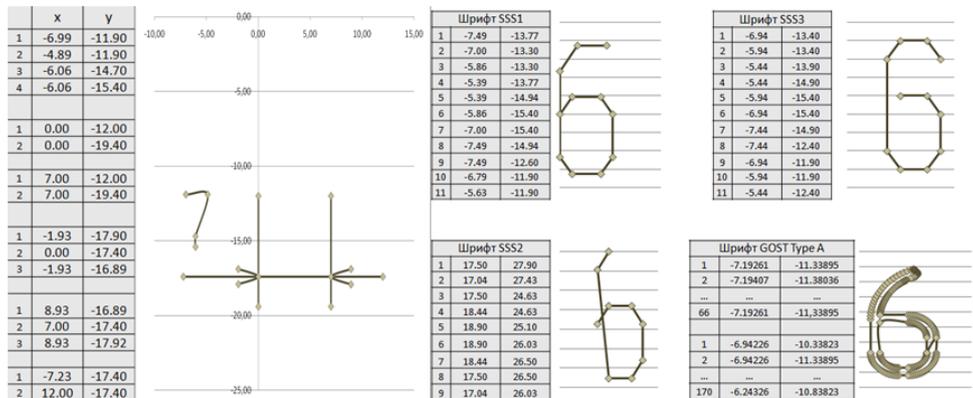


Рис. 3.13. Пример представления аннотационной информации в формате STEP геометрической информации. Так, Г. К. Горанский [23], С. П. Митрофанов [11] и В.Д. Цветков [24] рассматривали модули ручного кодирования информации об изделии. Они выделяли как поверхности, образующие контур детали, рассмотренные в работе ранее, так и их производные, представляющие собой технологические элементы типа фасок и канавок.

Последние, известные как «конструкторско-технологические элементы» (КТЭ), представлялись как типовые элементы из конструкции изделия, включающие несколько взаимосвязанных простых поверхностей (рис. 3.14) и выполняющие в модели определенные технические функции [25].

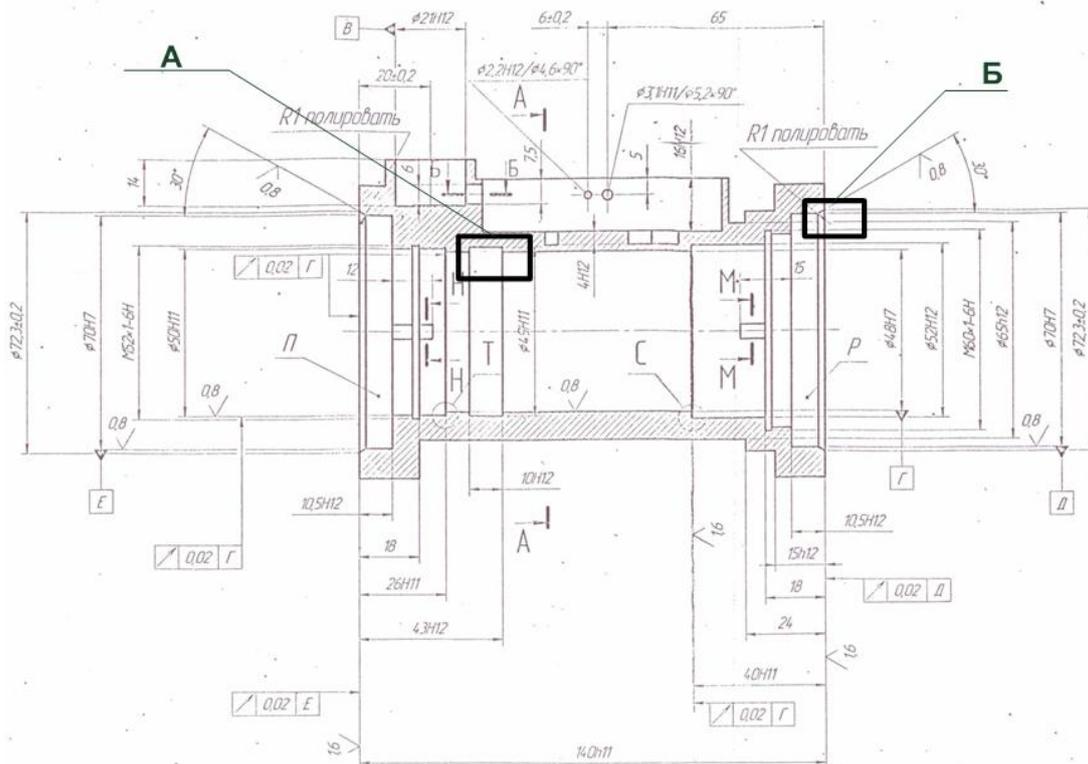


Рис. 3.14. Деталь с КТЭ типа цилиндрическая ступень (А) и КТЭ типа фаска (Б)

С технологической точки зрения КТЭ соответствует либо техпроцессу изготовления, либо одному или нескольким переходам. Конструкторско-технологические элементы имеют большое значение для повышения уровня автоматизации как при обработке на технологичность, так и при решении других задач ТПП. Так, например, КТЭ получили широкое распространение при производстве изделий на оборудовании с ЧПУ и, в частности, на металлорежущих станках.

В связи с тем, что выделение КЭ и КТЭ требует крупной методической работы и сбора информации от широкого круга экспертов, то рассмотрение представленного направления автоматизации целесообразно проводить на примере изделия низкой сложности [26].

В качестве такого изделия рассмотрим деталь типа «тело вращения» без специфичных элементов, что, с одной стороны позволяет сформировать правила для соответствующих КТЭ и отразить весь процесс их определения, а с другой позволяет обойтись без глубокого анализа предметной области, в котором нет необходимости с учётом нацеленности данной работы на разработку базовых методик. На рис. 3.15 представлен максимально упрощённый пример такой детали в виде вала с выделенным КТЭ.

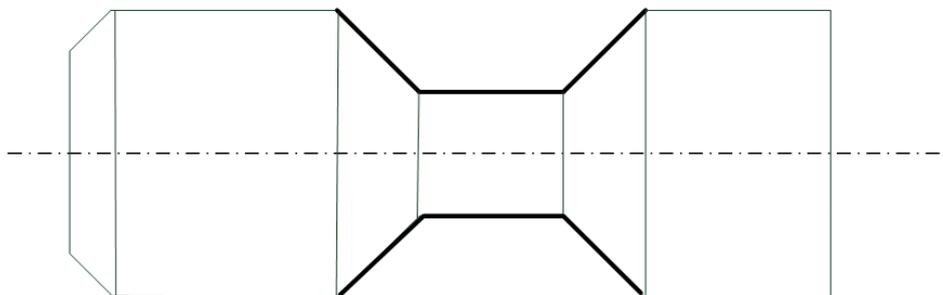


Рис. 3.15. Вал, содержащий несколько КЭ, объединенных в КТЭ

Отнесение элемента к определенному типу выполняется на основе анализа с использованием базы знаний. База состоит из вопросов на которые могут без проблем ответить эксперты. При этом характеристики, которые отражены в вопросах, могут быть автоматически проанализированы на основе трехмерной геометрии. Примерами таких вопросов являются следующие:

1. Количество цилиндрических примитивов в модели два или более?
2. Есть цилиндрические примитивы с одинаковыми диаметрами?
3. Среди примитивов с одинаковыми диаметрами есть группы (два и более примитива), располагающиеся на одной окружности?
4. Таких групп более одной?

Прослеживается цепочка рассуждений и последовательного уточняющего анализа. В результате КТЭ относится к одному из существующих типов, либо отсеивается для последующего ручного анализа и занесения в базу. Форма хранения КТЭ в базе мало отличается от формы хранения отдельных элементов, представленной ранее.

Другим типом знаний в системе являются продукционные правила типа:

- Если $(K1 > 2)$ и $(K3 < 5)$, то (Тип КТЭ = Конус)
- Если $(K1 < 2)$ и $(K3 > 5)$, то (Тип КТЭ = Фаска)
- Если $(K1 \geq 2)$ и $(K3 \geq 5)$, то (Использовать механизм нечеткого вывода)

Данные правила разрабатываются специально для системы, опираются на определенные значения конкретных параметров и определяют последовательность действий в зависимости от исхода расчета. Такие правила могут храниться либо в текстовом виде, требующем интерпретации, либо в виде программных инструкций, позволяющих после получения данных переходить к непосредственному сравнению.

3.2.3 Поиск аналогов на основе геометрического сходства

Методика поиска полного аналога детали [27] базируется на сравнении геометрии деталей в виде набора примитивов и их взаимосвязей. При этом определяется соответствие между таблицами данных. Определяется коэффициент соответствия, который будет тем больше, чем более схожа геометрия. Непосредственный выбор аналога выполняется в диалоговом режиме, когда оператор вместо множества деталей из базы видит только отобранные системой с максимальной степенью соответствия. Так для изделия (рис. 3.16 в) после поиска будут предложены оператору варианты (б) и (з), но выше в списке вариантов будет вариант (з), так как он имеет максимальное сходство геометрических эле-

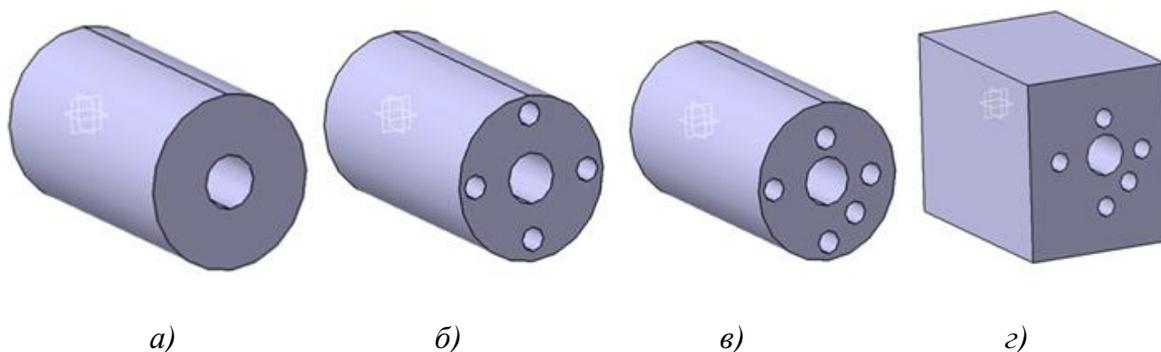


Рис. 3.16. Пример моделей, имеющих как сходства в конструкции (а, б, в), так и внешние отличия (а, б, з), критичные при выборе технологии изготовления

В результате поиска аналога становится возможным не только заимствовать технологический процесс или его часть, но и оценить ряд дополнительных аспектов проекта производства изделия, которые отражаются в системе управления данными о продукте (PDM-система). К таким данным относятся следующие:

- Применяемая оснастка.
- CAE-расчеты.
- Модификации, вносимые в процессе работы над проектом.
- Программы для оборудования с ЧПУ (например, станки с ЧПУ).
- Имеющиеся прототипы.
- Контакты поставщиков.

3.3 Применение шаблонных бизнес-процессов при проектировании новых устройств

Разработка нового прибора включает в себя использование множества средств информационной поддержки на этапах его жизненного цикла. С точки зрения проектирования наиболее важными этапами являются разработка концепции, корпуса и электромеханической части. Чем больше уровень интеграции достигается на этих этапах, тем более комплексным будет процесс разработки. Необходимо выделить два вида интеграции:

- Интеграция на уровне файлов.
- Интеграция на уровне процессов.

Интеграция файлов обеспечивается за счет использования систем класса PDM. Такие системы широко распространены, но обеспечивают, в основном, хранение данных и их просмотр. Интеграция на уровне процессов позволяет передавать внутрисистемные данные и осуществлять коммуникацию между системами.

В таком случае говорится о наличии взаимной интеграции отдельных систем. Примером такой интеграции является, например, совместный инженерный расчет в двух и более CAE-системах, когда блоки информации, генерируемые одной системой в процессе расчета, передаются в другую, подвергаются модификации и возвращаются для дальнейшего использования. Так как такая передача может осуществляться с достаточно большой частотой, то использование интеграции на уровне файлов вместо интеграции на уровне процессов может существенно снизить скорость проведения

расчетов и практически свести к нулю эффективность и уровень автоматизации. В результате может потеряться весь смысл совместного расчета.

Интеграция на уровне процессов может быть многоуровневой в зависимости от родства систем, что выражается в механизмах работы и графическом ядре. Так, системы трехмерного моделирования, построенные на одном графическом ядре, имеют интеграцию на нижнем уровне, но при наличии достаточно существенных отличий в механизмах работы, взаимодействие может свестись к минимуму. Наиболее распространенным видом интеграции, который в то же время обладает достаточным для повседневных задач функционалом, является интеграция на уровне API¹³.

Традиционно API предоставляет программный доступ к функциям систем (например, возможность создания элементов в средах трехмерного моделирования или запуск обработки с заданными параметрами в САМ-системах), что позволяет выполнять их автоматически или по заранее заданному сценарию работы. В случае наличия API у двух систем между ними может быть сформирован «мост» на базе программного кода и общих управляющих инструкций. Несмотря на наличие промежуточного слоя, ограничивающего уровень взаимодействия по сравнению с прямыми интерфейсами, такая схема взаимодействия достаточно универсальна и функциональна.

Более существенные ограничения на взаимодействие накладываются при наличии различных языков API, используемых в коммутируемых системах, либо при использовании компилируемого языка в API, что также сужает канал коммуникациями между системами, так как большинство задач при таком взаимодействии требует динамического выполнения. Схемы взаимодействия с однотипным и различным API представлены на рис. 3.17.

Типовым примером обеспечения максимального уровня взаимодействия на основе API является использование интерпретируемого языка высокого уровня Python¹⁴. Данный язык широко распространен среди приложений относящихся к типу Open Source. Некоторые приложения полностью написаны на базе Python (например, PyCAM).

¹³ англ. Application Programming Interface – интерфейс программирования приложений. Набор готовых классов, процедур, функций, структур и констант, предоставляемых приложением (библиотекой, сервисом) для использования во внешних программных продуктах. Используется программистами для написания всевозможных приложений.

¹⁴ Python – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода. Синтаксис ядра минималистичен. В то же время стандартная библиотека включает большой объем полезных функций.

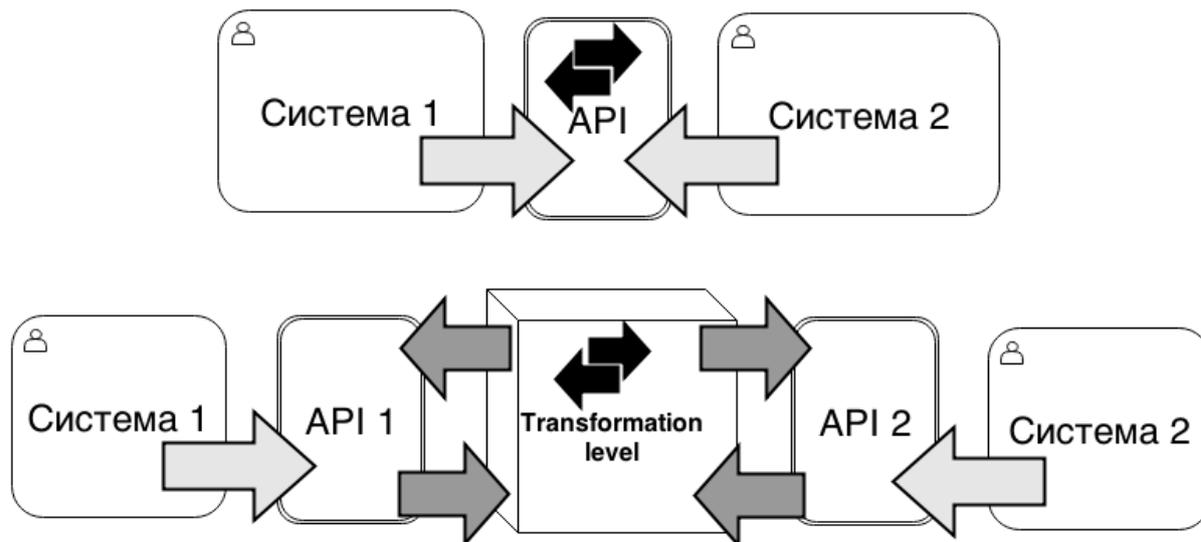


Рис. 3.17. Схемы взаимодействия с однотипным и различным API

С использованием приложений, которые применяют для API данный язык можно выстроить и бизнес-процесс сопровождения процесса разработки изделия и бизнес-процесс проектирования корпуса изделия.

С точки зрения автоматизации проектирования и технологической подготовки производства в основном важно взаимодействие между программным обеспечением. Система, которая может обеспечить взаимодействие через Python API для автоматизации выполнения определенных бизнес-процессов в рамках ТПП может быть обозначена как «Автоматизированная система технологической подготовки производства на базе ЯВУ Python», или сокращенно TAPS (англ. *Technologic Automation Python based System*). Структура такой системы и алгоритмы взаимодействия структурных модулей представлены в прил. 2.

Представленное направление является достаточно новым и активно развиваемым. Применение таких систем потенциально позволит перейти на новый уровень методологической работы, когда традиционные методики и способы использования программных приложений преобразуются в алгоритмы и сценарии использования в точности описывающие последовательность действий для бизнес-процессов проектирования и разработки. В результате будет реализован переход на другую ступень автоматизации.

Внедрение систем класса TAPS или их функциональных частей в ближайшие годы позволит существенно сократить время, которое затрачивается на вполне рутинные операции, не требующие использования знаний экспертов, в результате чего производство выйдет на новый уровень программно-аппаратной синхронизации и согласованной работы между системами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Модули системы FreeCAD

FreeCAD это трёхмерная твердотельная САПР. Проект FreeCAD основан на лицензиях GPL и LGPL. FreeCAD в первую очередь предназначен для машиностроения, но его также можно применять и в более широком круге задач, например, таких как архитектурное моделирование.

FreeCAD – это кроссплатформенное ПО (в настоящее время полноценно работает в системах Windows, Linux/Unix и Mac OS). FreeCAD обладает встроенными Python интерпретатором и API, которые охватывают большую часть функционала. FreeCAD документы хранятся с расширением «.fcstd» (формат, основанный на контейнере «.zip»), могут содержать множество различных типов информации. Среди модулей можно выделить следующие:



Полигональный инструментарий для работы с триангулярными сетками (полигональные модели).



Инструментарий деталей для работы с CAD деталями.



Чертежный модуль для выполнения основных задач 2D черчения.



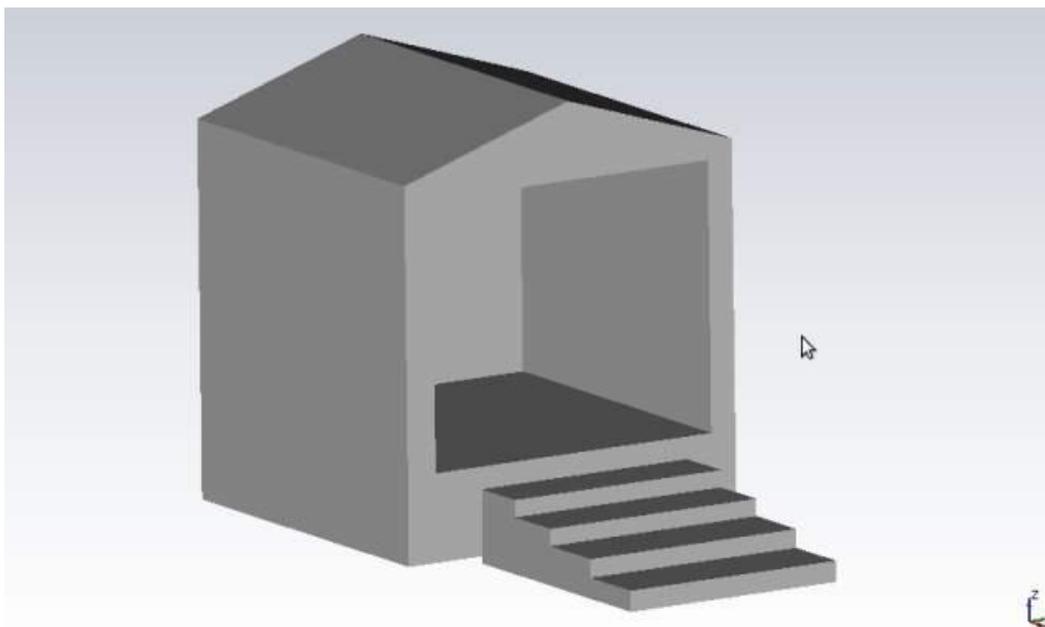
Инструментарий автоматике для изучения движений роботов.

Эти модули соответствуют тому функционалу, который присутствуют в системе по умолчанию без дополнительных надстроек.

Полигональное моделирование в FreeCAD.

Инструментарий полигонального моделирования

Предназначен для работы с треугольными полигонами. Сетки (англ. *Meshes*) – это специальный тип объектов, состоящих из треугольников, соединенных через их вершины.



Множество 3D приложений используют сетки в качестве основного типа 3D объекта (такие, как *SketchUp*, *Blender*, *Maya* или *3d Studio Max*). Подобные сетки - это очень простые объекты, содержащие только вершины, ребра и грани, поэтому их очень легко создать, модифицировать, разбивать, растягивать, а также передавать из одного приложения в другое без потерь. Кроме того, так как это очень простые данные, 3D приложения обычно управляют очень большим количеством таких поверхностей без каких-либо проблем. По этим причинам часто трехмерные сетки используются в приложениях, связанных с кино, анимацией и созданием изображений.

Несмотря на это, в инженерных областях в настоящее время сетки используются очень ограничено. Это связано с тем, что поверхности не обладают информацией о массе и также не существует способа автоматически узнать, находится ли точка (или треугольник) за пределами объекта, так что они не ведут себя как твердые тела. Это означает что все твердотельные операции, такие как сложение или вычитание всегда труднее выполнять на сетках, так как они часто возвращают ошибки.

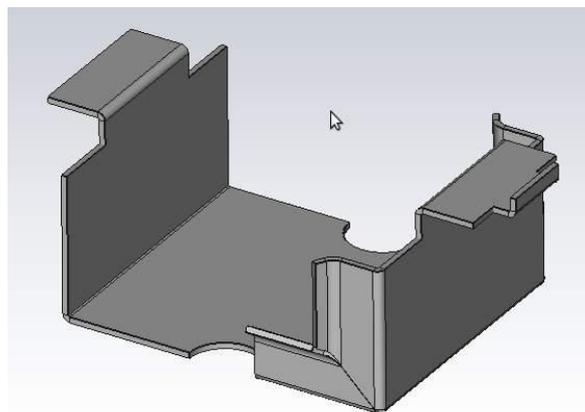
Использование модуля полигонального моделирования

Модуль полигонального моделирования обладает очень простым интерфейсом, все его функции сгруппированы в меню. Наиболее важные операции, которые вы можете провести над сеткой:

- Экспорт сетки в некоторые файловые форматы.
- Импорт сетки из нескольких файловых форматов.
- Конвертировать твердотельной детали в сеточный объект.

- Анализ кривизны, граней и оценка возможности преобразования сетки в твердое тело без ошибок.
- Разворот полигональных нормалей (перпендикуляров к треугольникам).
- Исправление разрывов в сетке.
- Удаление граней из сетки.
- Объединение, вычитание и выделение пересечений в сеточных объектах.
- Обрезание сетки по линии.

CAD возможности FreeCAD базируются на ядре **OpenCasCade**. OpenCascade – это CAD ядро профессионального уровня, что выражается в возможностях продвинутого манипулирование 3D объектами и средой их отображения. CAD-объекты, в отличие от **полигональных** объектов, являются более сложными, и, следовательно, дают доступ к расширенному инструментарию, включающему булевы операции, использование эскизов, а также к истории построения и параметрическому моделированию.



Инструменты

Инструменты, модуля деталей расположены в меню **Part**, которое появляется при загрузке модуля **Деталей**.

Примитивы

Эти инструменты создают объекты-примитивы.



Box. Создает прямоугольный параллелепипед с указанными размерами.



Cone. Создает конус с указанными размерами.



Cylinder. Создает цилиндр с указанными размерами.



Sphere. Создает сферу с указанными размерами.



Torus. Создает тор (кольцо) с указанными размерами.

Изменение объектов

Это инструменты для изменения существующих объектов на основе булевых операций и вспомогательного инструментария.



Booleans. Производит логические операции над объектами.



Fuse. Объединяет два объекта.



Common. Формирует пересечение двух объектов.



Cut. Вычитает один объект из другого.



Extrude. Вытягивает плоские грани объекта.



Fillet. Скругляет ребра объекта.



Revolve. Создает объект вращением эскиза вокруг оси.



Section. Создает сечение, как пересечением секущей плоскости и объекта.

Модуль **Черчения** позволяет формировать чертежи на основе проекций трехмерной модели. Доступны настраиваемые рамки, заголовки и выбор логотипа.

Инструменты

Инструменты для создания, настройки и экспортирования чертежных листов.



Новый лист. Создает новый лист опираясь на существующий файл SVG.



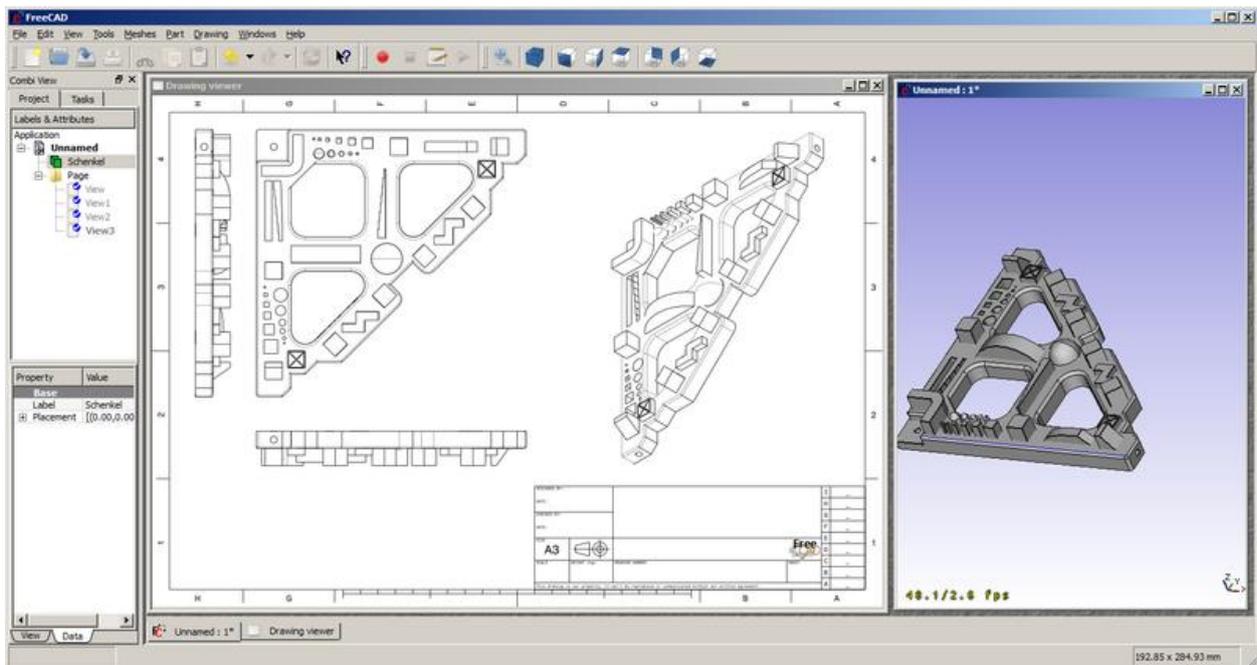
Новый чертёж А3: Создает чертёж формата А3 с шаблоном FreeCAD по умолчанию.



Разместить вид. Помещает вид выделенного объекта на активный лист чертежа.



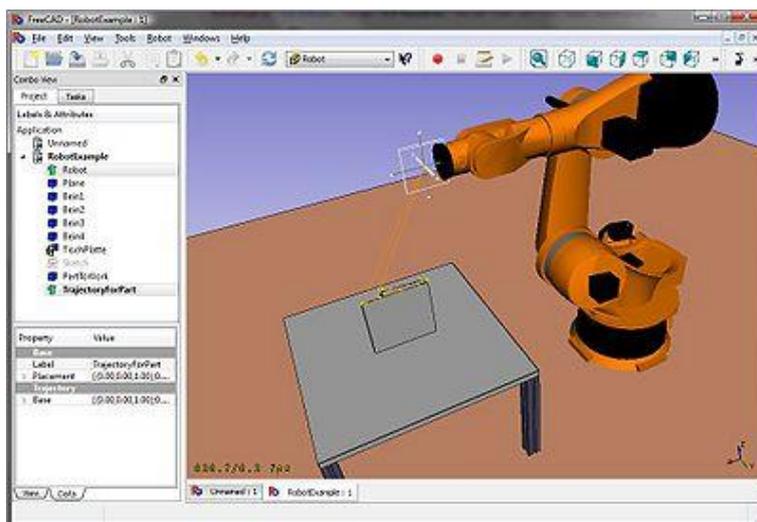
Сохранить лист. Сохраняет указанный лист в SVG¹⁵ формате.



На рисунке представлено соответствие между видами в модуле черчения и исходной трехмерной моделью. Модуль автоматизации предназначен для имитации промышленного класса шестиосевых роботов, таких как Kuka. В нем можно решать следующие задачи:

- Создать среду моделирования с роботом и заготовкой.
- Создать траекторию перемещения узлов робота.
- Разложить часть CAD детали в траекторию.
- Имитировать движения робота и его пространственные ограничения.
- Экспортировать траекторию в программный файл робота.

¹⁵ Формат хранения векторных данных, позволяющий выполнять последующее редактирование чертежа и вывод его на печать в любом масштабе без потери качества.



Роботы

Инструменты для создания и управления шестиосевыми роботами:



Создать робота. Помещает нового робота на сцену.



Имитировать траекторию. Открытие настроек и запуск имитации движения робота.



Экспортировать траекторию. Экспортировать траекторию перемещения в программный файл робота.



Установить в стартовую позицию. Устанавливает робота в стартовую позицию.



Восстановить исходную. Перемещает робота в нулевую точку.

Траектории

Инструменты для создания и управления траекториями. Существуют параметрические и непараметрические траектории.

Непараметрические траектории



Создать траекторию. Создание траектории.



Установить ориентацию по умолчанию. Устанавливает базовое расположение робота.



Задать параметры по умолчанию. Установка значений параметров по умолчанию.



Запомнить положение робота. Сохраняет текущее положение робота в качестве точки траектории.



Запомнить положение. помещает текущее положение курсора мыши на траекторию.

Параметрические траектории



Создать траекторию из ребер. Помещает новый объект, который разбивается на ребра для последующего сохранения в траекторию.



Настройка траектории. Позволяет изменять одно или несколько свойств траектории.

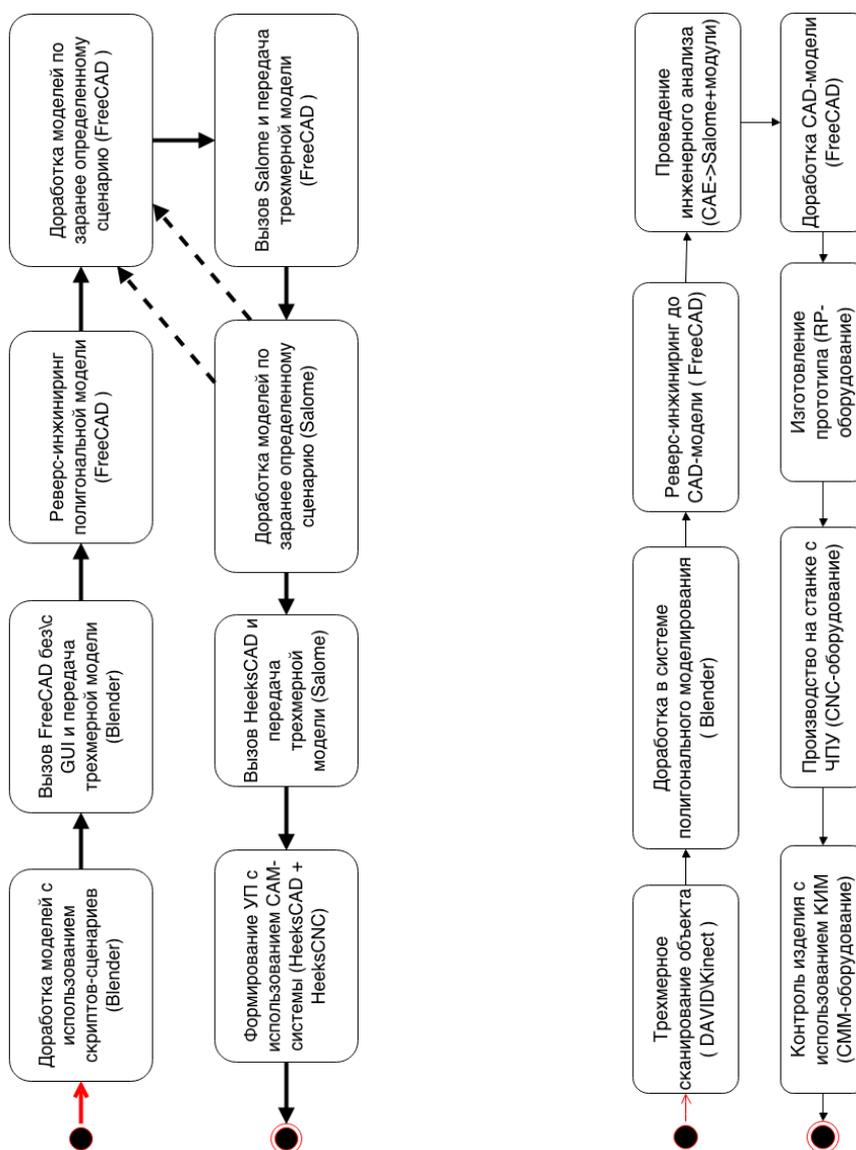


Объединение траекторий. Создает объединение из нескольких отдельных траекторий.

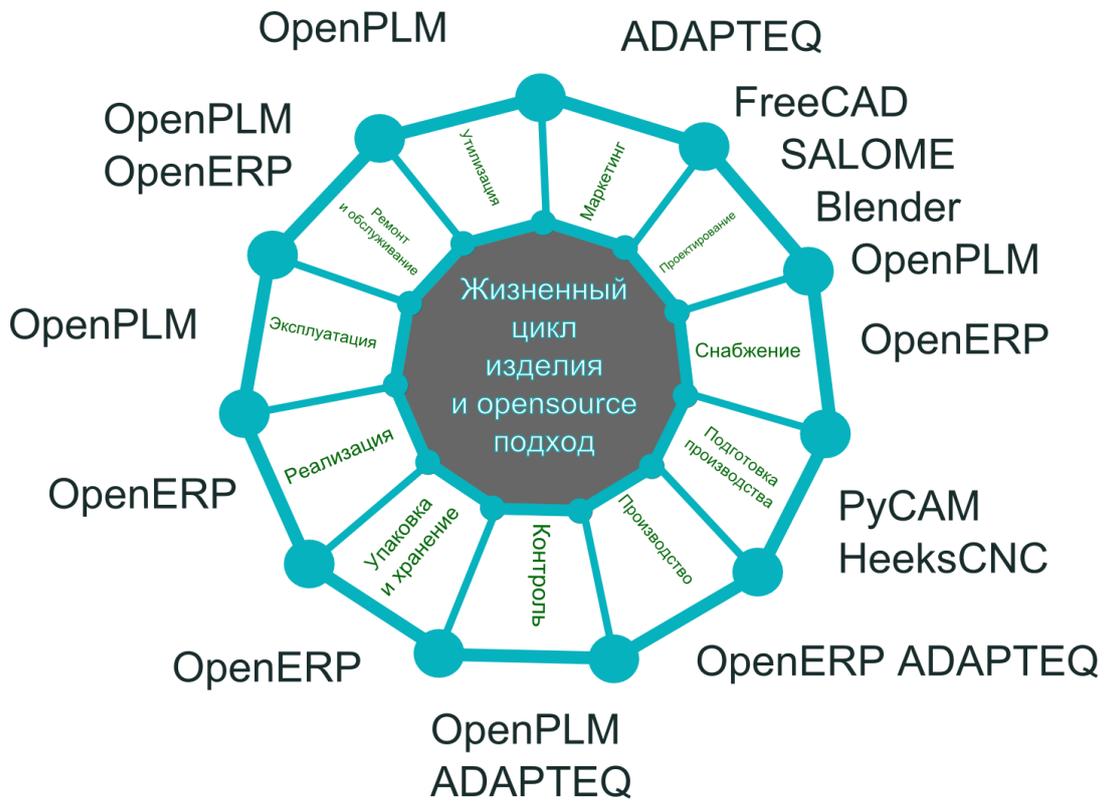
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ TAPS

Унификация взаимодействия программного обеспечения через API на уровне проектирования и полного бизнес-процесса подготовки к производству



Основа ЖЦИ и применение Open Source Software в TAPS



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОСНОВНЫЕ СУЩНОСТИ В ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ ФОРМАТА STEP

Во время разработки основной задачей стандарта обмена данными (STEP), выполняемого по программе PDES (англ. *Product Data Exchange Specification* – спецификация обмена данными об изделии) была возможность получения информации, включающей обработанную на компьютере модель изделия в нейтральном формате без потери полноты и целостности на протяжении всего жизненного цикла [28].

Основная структура файла STEP стандартизирована [29]. Каждая из разновидностей стандарта имеет свой, особенный набор сущностей, дополняющий базовый состав, свойственный всем стандартам STEP.

В трёхмерной модели имеются сущности, соответствующие каждому типу примитивов из представленной ранее классификации. Наиболее часто используемые сущности:

CARTESIAN_POINT

Точка в декартовой системе отсчета (содержит атрибут имени и набор координат). Например:

```
#671=CARTESIAN_POINT(  
  'Vertex', (  
    128.733230591,  
    -58.360746836,  
    31.8826213057));
```

DIRECTION

Направление (содержит атрибут имени и набор векторов). Например:

```
#53=DIRECTION('Axis2P3D Direction',(-1.,0.,0.));
```

AXIS2_PLACEMENT_3D

Положение осей координат (содержит атрибут имени, который может характеризовать к какому элементу относятся оси, и набор ссылок на элементы, определяющие положение и направление осей координат). Например:

```
#86=AXIS2_PLACEMENT_3D('Circle Axis2P3D',#84,#85,$);
```

CLOSED_SHELL

Одна из центральных сущностей модели, определяющая все тело и указывающая на элементы, входящие в ее состав (содержит атрибут имени и набор ссылок на элементы. Например:

```
#51=CLOSED_SHELL(  
  'Closed Shell',(br/>    #93,#117,#148,#160,#191,#203,#234,#246,#277,  
    #289,#320,#332,#363,#375,#397,#404,#444,#461,  
    #489,#529,#546,#556,#587,#599,#627,#649,#661,  
    #689,#720,#732,#754,#766));
```

VECTOR

Вектор (содержит атрибут имени, ссылку и характеристику). Например:

```
#182=VECTOR('Line Direction',#181,1.);
```

CIRCLE

Одна из основных структурных сущностей модели. Является элементом, характеризующим окружность. (Содержит атрибут имени, ссылку на положение окружности и диаметр окружности). Например:

```
#102=CIRCLE('generated circle',#101,38.0994529724);
```

CONICAL_SURFACE

Коническая поверхность. Является производной от нескольких окружностей и, в связи с тем, что не может в полной мере характеризовать коническую поверхность, она является дополняющей сущностью для набора окружностей (содержит атрибут имени, ссылку на положение конической поверхности, диаметр основания и угол конуса). Например:

```
#294=CONICAL_SURFACE(  
    'Cone ', #293, 38.0994529724, 1.30220331971);
```

CYLINDRICAL_SURFACE

Цилиндрическая поверхность. Является производной от нескольких окружностей и, в связи с тем, что не может в полной мере характеризовать цилиндрическую поверхность, она является дополняющей сущностью для набора окружностей (содержит атрибут имени, ссылку на положение цилиндрической поверхности и диаметр). Например:

```
#122=CYLINDRICAL_SURFACE(  
    'generated cylinder', #121, 26.0955162048);
```

EDGE_LOOP

Каркас (содержит несколько ссылок на свои составляющие, которые могут быть как граничными кривыми, так и окружностями или другими элементами). Например:

```
#271=EDGE_LOOP(' ', (#272, #273, #274, #275));
```

LINE

Одна из структурных сущностей модели. Является элементом, характеризующим линию, но не описывающим точные границы (содержит атрибут имени и две ссылки на положение центра линии и вектор). Например:

```
#350=LINE('Line', #347, #349);
```

PLANE

Одна из структурных сущностей модели. Является элементом, характеризующим плоскость, но не описывающим ее границы (содержит атрибут имени и ссылку на положение системы координат плоскости). Например:

```
#466=PLANE('Plane', #465);
```

Сущности, характеризующие трёхмерные аннотации на модели изделия

POLYLINE

Полилиния (содержит обозначение в виде имени и ссылки на точки; объединение данных точек представляет собой один из элементов аннотации). Например:

```
#267=POLYLINE(  
  '\X2\042004300437043C04350440\X0\ .2', (  
    #268, #269, #270, #271, #272, #273, #274, #275, #276,  
    #277, #278, #279, #280, #281, #282, #283, #284, #285,  
    #286, #287, #288, #289, #290, #291, #292, #293, #294,  
    #295, #296, #297, #298, #299, #300, #301, #302, #303,  
    #304, #305, #306, #307, #308, #309, #310, #311, #312,  
    #313, #268));
```

GEOMETRIC_CURVE_SET

набор геометрических кривых (содержит обозначение в виде имени и ссылки на отдельные элементы; данная сущность и представляет собой описание конкретной аннотации). Например:

```
#258=GEOMETRIC_CURVE_SET(  
  'general dimension', (  
    #267, #314, #386, #448, #592, #674, #746, #850, #1026,  
    #1029, #1032, #1036, #1042));
```

В представленных сущностях имеется несколько обозначений:

- ☐ *'text'* – наименование в виде текста;
- ☐ *#N^o* – ссылка на соответствующую сущность с номером №;
- ☐ *\$* – знак, определяющий отсутствие ссылки.

Каждый уровень абстракции модели описывается определённым множеством или несколькими множествами. Так, например, точки описываются следующим множеством:

$$Tc = \{ (Tc_i, Link Tc_i) \mid i \leq I; i \in N \}, \text{ где}$$

Tc_i – точка;

$Link Tc_i$ – ссылка на данную точку в структуре модели;

I – количество точек в модели;

N – множество натуральных чисел.

Линии, окружности и плоскости описываются следующим образом:

Линии – $Лн = \{ (Лн_i, Link Лн_i) / i \leq I; i \in N \}$;

Окружности – $Ок = \{ (О_{ки}, Link О_{ки}) / i \leq I; i \in N \}$;

Плоскости – $Пл = \{ (П_{ли}, Link П_{ли}) / i \leq I; i \in N \}$.

Элементы более высокого уровня также представляют собой множества:

Цилиндры – $Цл = \{ (Цл_i, Link Цл_i) / i \leq I; i \in N \}$;

Конусы – $Кн = \{ (Кн_i, Link Кн_i) / i \leq I; I \in N \}$;

Сферы – $Сф = \{ (Сф_i, Link Сф_i) / i \leq I; i \in N \}$.

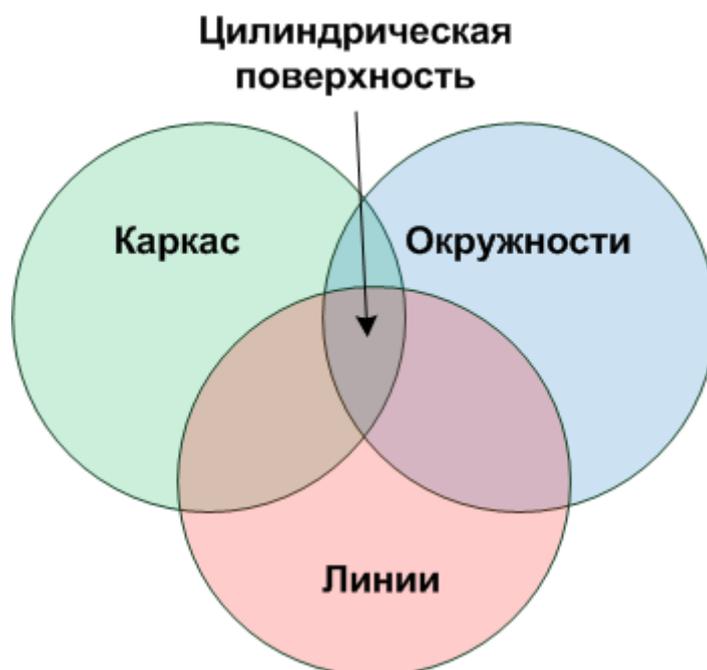
Эти множества выстраиваются за счёт объединения других множеств и определяются путём анализа их пересечений. Так, цилиндр соответствует каркасу, содержащему 2 направляющие и 2 окружности.

Множество каркасов описывается аналогичными формулами:

$Кр = \{ (Кр_i, Link Кр_i) / i \leq I; i \in N \}$.

Таким образом, множество цилиндрических поверхностей будет соответствовать пересечению множеств:

$$Цл = Кр \cap Лн \cap Ок$$



Аналогично будут выстраиваться другие типы элементов. Более сложные элементы типа усечённого цилиндра сформируются путём пересечения с большим числом составляющих.

За счет синтаксического анализа формата STEP возможно представление всех примитивов и их взаимосвязей в параметрическом виде. Тогда каждый элемент будет представлен в виде реляционной таблицы данных, описанной ниже.

Номер элемента		
Тип элемента		
Плоскость базового сечения	X	
	Y	
	Z	
Направление элемента	X	
	Y	
	Z	
Булевы функции		
Параметры элемента	Номер	
	Значение	
	Ссылка	
	Размерность	

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев М. Я., Грибовский А. А.* Декомпозиция структуры трехмерных моделей на наборы конструктивных элементов с использованием примитивов // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2. Труды молодых ученых / Под ред. В. О. Никифорова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – С. 281.
2. *Грибовский А. А.* Системная интеграция при моделировании и изготовлении изделий в среде расширенного предприятия // Научно-технический вестник. – 2011. – Том 73, выпуск № 3. – С. 71–74.
3. *Грибовский А. А., Афанасьев М. Я.* Организация единого информационного пространства виртуального предприятия // Научно-технический вестник. – 2011. – Том 76, выпуск № 6. – С. 113–117.
4. *Суслов А. Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. *ГОСТ 24642-81.* Допуски формы и расположения поверхностей. Термины и определения.
6. *Качество машин: справ. в 2-х т., Т. 2* / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
7. *Суслов А. Г., Корсакова И. М.* Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2010. – 111 с.
8. *Андреев Ю. С.* Разработка технологических методов оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей деталей приборов. Автореферат канд. дисс. – Санкт-Петербург, 2012. – 24 с.
9. *Андреев Ю. С., Валетов В. А.* Анализ параметрических методов описания шероховатости поверхности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Государственный

университет – учебно-научно-производственный комплекс – 2011. – Выпуск № 6. – С. 49-58.

10. **Куликов Д. Д., Соболев С. Ф.** Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства. Часть 9. Системы проектирования технологических процессов электронных приборов. Учебно-методическое пособие – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 80 с.
11. **Митрофанов С. П., Куликов Д. Д., Миляев О. Н. и др.** Технологическая подготовка гибких производственных систем // Под общ. ред. С. П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 352 с: ил.
12. **ГОСТ Р ИСО 10303-22-2001.** Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 22. Методы реализации. Стандартный интерфейс доступа к данным.
13. **ГОСТ Р ИСО 10303-21-99.** Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 21. Методы реализации. Кодирование открытым текстом структуры обмена.
14. **ГОСТ Р ИСО 10303-49-2003.** Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 49. Интегрированные обобщенные ресурсы. Структура и свойства процесса.
15. **Овсянников М. В., Шильников П. С.** Система электронной документации CALS - реальное воплощение виртуального мира // САПР и Графика. – 1997. – №8. – С.51–55.
16. **Куликов Д. Д., Яблочников Е. И., Бабанин В. С.** Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства. Часть 7. Системы проектирования технологических процессов – СПб.: НИУ ИТМО, 2011. – 136 с.
17. **Аверченков А. В.** Автоматизация распознавания и идентификации конструкторско-технологических элементов деталей в интегрированных САПР // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Брянск: На правах рукописи, 2005. – 259 с.
18. **ASME Y14.41-2003.** Digital Product Definition Data Practices.

19. *ISO/DIS 5459-1*: Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing: Datums and datum systems – Part 1: General definitions and basic concepts.
20. *ISO 10578*. Technical drawings – Tolerancing of orientation and location – Projected tolerance zone.
21. *ISO/TR 14638:1995*. Geometrical product specification (GPS) – Masterplan.
22. *Грибовский А. А., Дроздов А. Н.* Автоматизация технологической подготовки производства на основе аннотированных трехмерных моделей изделий // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2. Труды молодых ученых / Под ред. В. О. Никифорова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – С. 280.
23. *Горанский Г. К., Бендерова Э. И.* Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
24. *Цветков В. Д.* Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. – Минск: Наука и техника, 1979. – 264 с.
25. *Requicha A. G.* Integration of feature based design and feature recognition // 1995 ASME International Computers in Engineering Conference. – Sep. 1995; Vandenbrande, J. H. Geometric computation for the recognition of spatially interacting machinable features. / J. H. Vandenbrande, A. G. Requicha // Advances in Feature Based Manufacturing. – 1994. P. 83–106.
26. *Пиль Э. А.* Теория сложности обработки деталей в машиностроении. – СПб.: РЕМО & Со. г. Санкт-Петербург, 1997. – 132 с. ил.
27. *Грибовский А. А.* Автоматизация поиска деталей-аналогов на базе трехмерных моделей // Научно-технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий» ОГТУ. 2011. – № 5 (289). – С. 43–49.
28. *Колчин А. Ф., Стрекалов А. Ф., Сумароков С. В.* Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. – 303 с: ил.
29. *ГОСТ Р ИСО 10303-1-99*. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Кафедра технологии приборостроения относится к числу ведущих кафедр института со дня его основания в 1931 году. Тогда она называлась кафедрой механической технологии и возглавлялась известным ученым в области разработки инструмента профессором А. П. Знаменским. Позже она была переименована в кафедру технологии приборостроения.

За время своего существования кафедра выпустила из стен института более тысячи квалифицированных инженеров, более сотни кандидатов и докторов наук. В разные годы ее возглавляли известные ученые и педагоги профессора Николай Павлович Соболев и Сергей Петрович Митрофанов.

Кафедра имеет выдающиеся научные достижения. Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, профессором С. П. Митрофановым были разработаны научные основы группового производства, за что он был удостоен Ленинской премии СССР. Методы группового производства с успехом применяются в промышленности и постоянно развиваются его учениками. Заслуженным изобретателем Российской Федерации Юрием Григорьевичем Шнейдером разработаны метод и инструментарий нанесения регулярного микрорельефа на функциональной поверхности.

В настоящее время кафедра осуществляет выпуск бакалавров и магистров по направлениям подготовки 200100 «Приборостроение» и 230100 «Информатика и вычислительная техника».

Грибовский Андрей Александрович
Андреев Юрий Сергеевич
Афанасьев Максим Яковлевич

**Интегрированные технологии производства
и современные среды моделирования
в приборостроении**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н. Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49