

Министерство сельского хозяйства РФ  
Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия  
имени П.А.Столыпина

*Кафедра «Материаловедение и технология машиностроения»*

# **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

**Ульяновск**

**Системы автоматизированного проектирования автомобилей и тракторов:**

Конспект лекций/Составил Абрамов А.Е. – Ульяновск: ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА, 2016. – 104 с.

В конспекте лекций рассмотрены место САПР-ТП в системе технологической подготовки производства и жизненном цикле изделия, методология построения САПР-ТП, системный подход в проектировании, математические модели объектов проектирования в САПР-ТП, методы проектирования технологического процесса с использованием ЭВМ, перспективы систем автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. Предназначен для студентов следующих направлений подготовки: 23.05.01(190109.65) – «Наземные транспортно-технологические средства» по специальности «Автомобили и тракторы» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению учебно-методической комиссии инженерного факультета Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии имени П.А.Столыпина.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....        | 4   |
| 1 МЕСТО САПР-ТП В СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЯ .....       | 21  |
| 1.1 Место САПР ТП в системе технологической подготовки производства .....                               | 21  |
| 1.2 Основные задачи ТПП .....                                                                           | 21  |
| 1.3 Функции и средства автоматизации ТПП .....                                                          | 25  |
| 1.4 Функции и задачи технологической подготовки производства ....                                       | 27  |
| 1.5 Стадии жизненного цикла изделия .....                                                               | 30  |
| 2 МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ САПР-ТП .....                                                                  | 37  |
| 2.1 Основные требования к САПР и средствам их реализации.....                                           | 37  |
| 2.2 Уровни автоматизации проектных работ в САПР .....                                                   | 41  |
| 2.3 Требования к объектам проектирования в САПР .....                                                   | 41  |
| 3 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ .....                                                               | 46  |
| 3.1 История развития системного подхода .....                                                           | 47  |
| 3.2 Основные понятия теории систем и системного подхода .....                                           | 51  |
| 3.3 Системный подход и инженерная деятельность .....                                                    | 56  |
| 4 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В САПР-ТП .....                                         | 64  |
| 4.1 Понятие математического моделирования .....                                                         | 64  |
| 4.2 Требования к математическим моделям в САПР й.....                                                   | 67  |
| 4.3 Виды математических моделей .....                                                                   | 69  |
| 4.4 Математические модели на микро-, макро- и метатуровне .....                                         | 76  |
| 5 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ.....                             | 81  |
| 5.1 Понятие о методах автоматизированного проектирования технологического процесса .....                | 81  |
| 5.2 Метод прямого документирования .....                                                                | 82  |
| 5.3 Параметрический метод .....                                                                         | 82  |
| 5.4 Метод использования аналогов .....                                                                  | 84  |
| 5.5 Метод проектирования на основе типизации .....                                                      | 85  |
| 5.6 Метод синтеза .....                                                                                 | 85  |
| 6 ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ..... | 87  |
| 6.1 Обзор современных САПР-ТП .....                                                                     | 89  |
| 6.2 Основные преимущества применения станков с ПУ .....                                                 | 93  |
| 6.3 САПР-ТП как инструмент управления гибких технологических систем .....                               | 94  |
| ЛИТЕРАТУРА .....                                                                                        | 100 |

# **ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

## **Проблемы автоматизации технологического проектирования**

Трудоемкость и стоимость технологической подготовки производства (ТПП) растет из года в год. За последние 20 лет трудоемкость увеличилась в 3 раза. Увеличение сложности ТПП вызвано следующими причинами:

1. машины и приборы становятся из года в год все сложнее. Приборы и машины насыщаются электроникой, используют новые материалы, требуется более высокая точность изготовления деталей и узлов. Такое усложнение приводит к увеличению трудоемкости проектирования технологических процессов.

2. в промышленности сейчас широко используются станки с числовым программным управлением. Для них необходима разработка операционной технологии и составление управляющих программ, что также приводит к увеличению трудоемкости проектирования технологических процессов.

3. в настоящее время необходимо проектировать качественные технологические процессы, т. е. изделия, изготовленные по этим процессам, должны отвечать требованиям конструктора и иметь минимальную стоимость, следовательно нужно проектировать оптимальные технологические процессы . От этого во многом зависит прибыль фирмы.

Для нахождения оптимального технологического процесса необходимо разрабатывать варианты технологических процессов. Предположим, что имеется технологический процесс механической обработки детали, состоящий из пяти последовательно выполняемых операций. Пусть для каждой операции возможны 6 вариантов ее выполнения. Тогда количество вариантов технологического процесса составит  $6^5=7776$  вариантов.

Если учесть возможность перестановки операций, то количество вариантов увеличится во много раз. Технолог физически не может спроектировать такое количество вариантов. Поэтому разработка технологических процессов носит субъективный характер и качество спроектированных технологических процессов зависит от опыта и квалификации технолога, который их разработал.

Необходимо отметить, что чем меньше годовая программа выпуска изделия, тем выше стоимость технологической подготовки в общей стоимости продукции. В настоящее время наблюдается тенденция к снижению серийности производства машин и приборов и, следовательно, растет доля ТПП в общей себестоимости изделия.

В виду высокой трудоемкости и сложности технологической подготовки необходимо определить основные направления сокращения трудоемкости и стоимости проектирования технологических процессов.

Таким образом, главным направлением совершенствования ТПП является ее автоматизация и, в частности, использование ЭВМ для проектирования технологических процессов.

При проектировании технологических процессов у технолога имеются следующие сферы деятельности:

- **оформление технологической документации** ( маршрутные, операционные карты и другие документы). Это не творческая работа и может быть полностью автоматизирована.

- **поиск информации** ( поиск инструмента, приспособлений, оборудования, заготовок, припусков, нормативов по режимам резания и нормам времени и т. д ). Эта процедура автоматизируется на основе использования информационно-поисковой системы (ИПС). При использовании ИПС условие поиска технолог вводит в режиме диалога.

Условия поиска, которые являются стабильными, можно хранить в базе знаний.

- **стандартные расчеты** (расчет припусков, операционных заготовок, режимов резания и т. п.). Такие расчеты можно полностью автоматизировать.

- **принятие сложных логических решений** (выбор структуры процесса и операций, выбор баз и т. д.). Процесс принятия таких решений полностью автоматизировать не удастся.

Современная концепция применения ЭВМ при проектировании технологии основывается на создании человеко-машинных систем, в которых общение технолога с ЭВМ происходит в режиме диалога.

Такие системы получили название **"Системы автоматизированного проектирования технологических процессов"** или сокращенно **САПР ТП**. На западе эти системы получили название " Computer Automated Process Planning " или сокращенно **CAPP**.

Использование ЭВМ требует повышения квалификации технолога по нескольким направлениям.

Во-первых, пользователь САПР ТП должен быть технологом высокой квалификации, т.к. система сама выполняет рутинные работы по поиску нужной информации, стандартным расчетам и оформлению технологической документации. Технолог в режиме диалога должен решать творческие задачи, связанные с принятием сложных логических решений, которые не может выполнить система.

Во-вторых, технолог должен знать язык общения с САПР ТП и уметь ее эксплуатировать, включая анализ ошибок, возникающих в системе, и способы их устранения.

В третьих, у технолога появляется новая функция сопровождения САПР ТП. Эта функция заключается:

- в корректировке баз данных (знаний) и в пополнении их новой информацией;
- в нахождении и устранении алгоритмических ошибок;

- в разработке алгоритмов для дальнейшего совершенствования САПРТП.

Для внедрения САПР ТП на промышленном предприятии необходимы следующие предпосылки:

1. Наличие достаточно развитой теории автоматизированного проектирования. В данное время основы такой теории разработаны. Группа ученых нашей страны, которые принимали участие в разработке теории САПР ТП: Г. К. Горанский (НТК АН БССР), В. Д. Цветков (НТК АН БССР), С. П. Митрофанов (ЛИТМО), Б. Н.Челищев (НИАТ), Н. М Капустин. (МВТУ).

2. Наличие технических средств. В настоящее время персональные ЭВМ являются относительно недорогими средствами вычислительной техники и могут быть установлены на рабочем месте каждого технолога. ПЭВМ необходимо объединить в сеть для доступа пользователей к централизованным базам данных и электронным архивам.

3. Наличие автоматизированных систем. В технологических службах промышленного предприятия должен быть установлен комплекс систем проектирования технологических процессов и средств технологического оснащения. Внедряемые системы должны полностью отвечать специфике предприятия и обладать необходимыми функциональными возможностями. Для учета специфики производства разработка и внедрение систем должно выполняться с участием специалистов этого предприятия. Системы должны иметь эффективные механизмы настройки (адаптации) на условия предприятия. В частности, необходимо иметь удобные средства сопровождения баз данных и знаний.

На ранних стадиях развития САПР ТП настройка систем на условия предприятия была очень трудоемкой, что часто приводило к их отторжению от технологической подготовки. Системы разрабатывались в разных организациях, вместе эти системы не стыковались, что затрудняло их совместную эксплуатацию и сопровождение. Например, каждая система имела свои базы данных, что приводило к дублированию информации, и

программные средства их обслуживания, поэтому сопровождение баз данных было весьма трудоемким и не гарантировало от ошибок. Внедряемые системы должны быть достаточно гибкими для того, чтобы их можно было легко адаптировать к изменившимся условиям и функционально развивать в соответствии с потребностями предприятия.

4. Моральная и организационная готовность предприятия к использованию САПР ТП. Руководство и сотрудники технологических служб должны понимать необходимость применения ЭВМ для ТПП и чувствовать экономическую эффективность от автоматизации технологического проектирования. Должны быть разработаны документы, фиксирующие функции автоматизированных подразделений ТПП, а также права и обязанности лиц, участвующих в процессе эксплуатации и сопровождения автоматизированных подсистем ТПП. На предприятии должны существовать как службы технического обслуживания средств вычислительной техники, так и службы сопровождения автоматизированных подсистем ТПП. Руководящие сотрудники ТПП с помощью PDM системы должны уметь осуществлять эффективный автоматизированный контроль процесса технической подготовки изделия к его производству.

#### Анализ методов автоматизированного проектирования

Проектирование — это практическая деятельность, целью которой является поиск новых решений, оформленных в виде комплекта документации. Процесс поиска представляет собой последовательность выполнения взаимообусловленных действий, процедур, которые, в свою очередь, подразумевают использование определенных методов. Сложность процесса проектирования (как и любой другой творческой деятельности), нестандартность проектных (жизненных) ситуаций вызывают необходимость знания различных методов и умения владеть ими.

Метод — это прием или способ действия с целью достижения



желаемого результата. Его выбор зависит не только от вида решаемой задачи, но и индивидуальных черт разработчика (его характера, организации мышления, склонности к риску, способности принимать решения и нести за них ответственность и т. п.), условий его труда и оснащенности средствами оргтехники.

Применение метода позволяет найти то или иное решение и, в итоге, выбрать окончательное.

До 60-х годов орудиями труда проектировщика служили кульман, циркуль, логарифмическая линейка и другие подобные устройства. Проектирование велось по аналогии с использованием оригинальных решений, а ускорение работ достигалось преемственностью технических решений. Нередко возникали ситуации, когда период проектирования сложных систем был соизмерим со временем их морального износа. Длительность сроков вызывалась, прежде всего, большим объемом рутинных, ручных работ. Наличие в проектной деятельности формализованных процедур и широкое распространение компьютеров послужили основой автоматизации всех этапов жизненного цикла изделия:

- автоматизированная система планирования (АСП),
- автоматизированная система научных исследований (АСНИ),
- система автоматизированного проектирования (САПР),
- автоматизированный экспериментальный комплекс (АЭК),
- гибкое автоматизированное производство (ГАП) и автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП),
- автоматизированная система управления эксплуатацией (АСУ).

Основная тенденция развития таких систем идет в направлении создания автоматических систем, которые способны выполнять заданные функции или процедуры без участия человека. Роль человека заключается в подготовке исходных данных, выборе алгоритма (метода решения) и анализе полученных результатов.

Однако присутствие в решаемых задачах эвристических или сложно программируемых процедур объясняет широкое распространение автоматизированных систем. Здесь человек участвует в процессе решения, например, управляя им, вводя промежуточные данные. На степень автоматизации влияют продолжительность времени, отведенного на решение задачи, и её вид — типовая или нет. Так, при срочном поиске решения нестандартной задачи следует полагаться только на самого себя.

Применение автоматизированных и автоматических процедур порождает и новую проблему — достоверность получаемых результатов: ошибки могут быть следствием как неверных действий при вводе данных и управлении работой компьютера, так и сбоя в его работе. Для повышения чувства уверенности следует пользоваться правилом:

Ещё до решения любой по сложности задачи инженер должен представлять порядок получаемого результата или возможный вид решения.

### Определение понятия САПР-ТП

Система автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), как видно из названия, предназначена для проектирования технологического процесса. Рассмотрим понятия, входящие в это определение.

Проектирование – разработка описания еще не существующего объекта для его создания по этому описанию.

Цель проектирования технологического процесса (цель разработки его описания) – получение для инженерно-технического персонала и рабочих производственных подразделений (цехов, участков) достаточно подробного описания технологических приемов изготовления изделия, с указанием порядка их выполнения и расчетными значениями норм расхода материалов, времени, режимов обработки.

В описание ТП входят маршрутная карта, операционные карты,

операционные эскизы, ведомость оснастки. Всю эту технологическую документацию необходимо получить, используя САПР ТП.

Маршрутная карта – это перечень технологических операций с указанием модели оборудования по операциям в порядке их выполнения. В операционной карте приводится описание переходов с указанием режущего инструмента. Оборудование, инструменты связаны с понятием производственного процесса.

Производственный процесс представляет собой совокупность действий людей и орудий производства, необходимых для изготовления изделия.

В производственный процесс входят не только процессы, непосредственно связанные с изменением формы и свойств обрабатываемых деталей, сборка узлов и изделий, но и все необходимые вспомогательные процессы: складирование, упаковка, отгрузка изделий; ремонт и модернизация оборудования; изготовление инструмента и средств механизации; контроль на всех этапах.

Изделие – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Деталь – это изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций.

Разработка описания ТП с использованием средств автоматизации – это автоматизированная разработка. К средствам автоматизации относятся компьютер и программы. Пакет программ называют «Система автоматизированного проектирования ТП». Если расшифровать слово «проектирование», получится «система автоматизированного составления описания ТП». На предприятиях описание ТП называют просто «технологический процесс изготовления детали».

Прежде всего, дадим определение понятию «*проектирование*». В общем случае, под *проектированием* понимается процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не

существующего объекта, на основе первичного описания данного объекта и (или) алгоритма его функционирования. Проектирование является сложным творческим процессом целенаправленной деятельности человека, основанным на глубоких научных знаниях, использовании практического опыта и навыков в определенной сфере. От качества и сроков выполнения проектирования во многом зависит конкурентоспособность выпускаемой продукции. Этим обстоятельством объясняется постоянно расширяющееся использование САПР.

Под *системой автоматизированного проектирования* понимается комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователем системы), выполняющей автоматизированное проектирование. САПР классифицируются по нескольким признакам, наиболее важным из которых является тип объекта проектирования. Как видно из названия в САПР ТП объектом проектирования является технологический процесс.

#### Понятие о технологическом процессе

*Технологический процесс* – часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета труда. К предметам труда относят заготовки и изделия.

По последовательности выполнения различают ТП изготовления исходных заготовок, термической обработки, механической (и другой) обработки заготовок, сборки изделий.

В технологическом процессе изготовления заготовок происходит превращение материала в исходные заготовки деталей машин заданных размеров и конфигурации путем литья, обработки давлением, резки сортового или специального проката, а также комбинированными методами. В процессе

термической обработки происходят структурные превращения материала заготовок, изменяющие его свойства. При механической обработке наблюдается последовательное изменение состояния исходной заготовки (ее геометрических форм, размеров и количества поверхностей) до получения готовой детали. ТП сборки связан с образованием разъемных и неразъемных соединений составных частей изделия.

Для осуществления практически любого ТП в машиностроительном производстве необходимо применять совокупность орудий производства, называемых средствами технологического оснащения (СТО).

СТО, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части ТП, называют *технологической оснасткой* (режущий инструмент, штампы, приспособления, калибры и т.д.).

ТП выполняют на рабочих местах. *Рабочим местом* называют элементарную единицу структуры предприятия, где размещены исполнители работы, обслуживаемое технологическое оборудование, часть конвейера, а на ограниченное время – оснастка и предметы труда. Рабочее место - участок производственной площади, оборудованный в соответствии с выполняемой на нем работой.

Технологический процесс состоит из операций технологических и вспомогательных. Например, технологический процесс обработки валика состоит из токарных, фрезерных, шлифовальных и др. операций.

*Технологическая операция* – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Технологическая операция является основным элементом производственного планирования и технологического нормирования. На операцию устанавливают норму времени. К элементам технологических операций относятся: технологические и вспомогательные переходы, установы, позиции, а также рабочие и вспомогательные ходы.

*Технологический переход* – законченная часть технологической операции, выполненная одними и теми же средствами технологического

оснащения (приспособление, инструмент, при постоянном технологическом режиме и установке). Изменение одного из этих условий ведет к появлению нового перехода, так как технологический переход характеризует постоянство применяемого инструмента, поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке, а также постоянство технологического режима. Переходы могут быть простыми и сложными (фрезерование плоскости, подрезание торца, сверление отверстия – простые; обработка ступенчатого валика с применением 2-х резцов наладки – сложный переход).

*Вспомогательный переход* – законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода (закрепление детали, инструмента; возвращение инструмента в исходное положение, т.е. отвод, подвод инструмента, настройка на выполняемый размер).

*Установ* – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы. Изменение положения заготовки относительно поверхности стола станка или приспособления означает новый установ. Например, обтачивание вала с одного и другого концов до места зажима проводится за два установа, так как вал в течение одной операции дважды устанавливают и закрепляют.

*Позиция* – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительного инструмента или неподвижной части оборудования при выполнении определенной части операции. Установ и позиция имеют некоторые сходство и различие. Сходство заключается в том, что при каждом установе и позиции достигаются новые взаимные положения заготовки и инструмента. Различие обуславливается достижением каждого нового положения различными способами: при каждом новом установе – перезакреплением заготовки, при каждой новой позиции – перемещением или

поворотом заготовки или инструмента в новое положение. Следует учитывать, что замена установов на позиции сокращает время обработки заготовки, так как поворот приспособления с заготовкой занимает меньше времени, чем перезакрепление заготовки.

При обработке заготовок на токарно-револьверном станке позицией считается каждое из последовательных положений револьверной головки для ввода в действие нового инструмента. Применение многопозиционной обработки повышает производительность труда благодаря сокращению потерь времени на установ и закрепление заготовок или на смену режущего инструмента.

Технологический переход может состоять из нескольких проходов, или рабочих ходов, а также вспомогательных ходов.

*Рабочим ходом* (проходом) называется законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки.

*Вспомогательный ход* – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, необходимого для подготовки рабочего хода.

### Детализация цели проектирования технологического процесса

Главные особенности проектирования технологических процессов:

- многовариантность проектных решений;
- слабая формализация многих проектных задач.

К легко формализуемым задачам технологического проектирования относятся:

- - расчет припусков и межпереходных размеров;
- - расчет режимов резания;
- - нормирование технологического процесса.

Решение слабоформализуемых задач основывается на типовых решениях. Это такие задачи, как выбор заготовки, разработка маршрута обработки детали, выбор станков, выбор инструментов и т.д. .

Набор типовых решений и условий, при которых может быть применено каждое из них, составляют базу данных. При разработке технологического процесса в ЭВМ вводятся некоторые исходные данные по требуемой детали. После этого проверяется соответствие исходных данных условиям применимости типовых решений. При выполнении всех условий принимается соответствующее типовое решение.

Последовательность проектных процедур при синтезе технологических процессов может быть следующей:

- Ввод описания чертежа детали;
- Синтез маршрутов (планов) обработки для всех поверхностей детали;
- Синтез принципиальной схемы технологического процесса;
- Синтез маршрута обработки детали;
- Синтез состава и структуры операций технологического процесса;
- Доработка технологического процесса (расчет режимов резания, нормирование);
- Оформление документации.

Классификация существующих в машиностроении САПР ТП.

Системы автоматизированного проектирования технологических процессов можно классифицировать по ГОСТ 25501.8-80. Классификация нужна для анализа систем и сравнения их между собой. На основе такого анализа выбирается система, наиболее подходящая для данного предприятия.

Результаты классификация автоматизированных систем по этому стандарту выражаются в виде комплексного кода, который имеет вид:

X. K. X. X X. X. X. X



Как видно из этого рисунка комплексный код (КК) образован на основе параллельной классификации\* по восьми основаниям, т.е. полученные коды не зависят друг от друга.

**Первый знак** комплексного кода образуется при классификации по типу объекта проектирования

Классификация по типу объекта проектирования

Коды:

- 1 - САПР изделий машино- и приборостроения;
- 2 - САПР ТП в машино- и приборостроении;
- 3 - САПР объектов строительства;
- 4 - САПР организационных систем.

**Второй знак** комплексного кода образуется при классификации по разновидностям объекта проектирования. Этот код условно обозначен как "К". Он может иметь различное число знаков и является иерархическим кодом, который образуется в соответствии с отраслевыми классификаторами. Знаки 1 и 2 зависят друг от друга, следовательно, являются частью иерархической классификации.

**Третий знак** комплексного кода образуется при классификации по сложности объекта проектирования (любой объект может состоять из нескольких частей).

Классификация по сложности объекта проектирования

Коды:

- 1 - САПР простых объектов (количество составных частей до 100)
- 2 - САПР средней сложности (количество составных частей до 1000)
- 3 - САПР сложных объектов (количество составных частей до 10000)
- 4 - САПР высокой сложности (количество составных частей до 1000000)

**Четвертый знак** комплексного кода образуется при классификации по уровню автоматизации.

Для системы подсчитывается количество процедур и определяется, какое число из них автоматизировано.

#### Классификация по уровню автоматизации

Коды:

- 1 - низкоавтоматизированная (25% процедур автоматизированно);
- 2 - среднеавтоматизированная (от 25 % до 50% процедур автоматизированно);
- 3 - высокоавтоматизированная (свыше 50% процедур автоматизированно);

**Пятый знак** комплексного кода образуется при классификации по комплексности автоматизации проектирования. Процесс проектирования можно разбить на этапы с различным количеством процедур

#### Классификация по комплексности автоматизации проектирования.

Коды:

- 1 - одноэтапная автоматизация (автоматизирован лишь один этап);
- 2 - многоэтапная автоматизация ( автоматизировано несколько этапов);
- 3 - комплексная автоматизация (автоматизированы все этапы). **Шестой**

**знак** комплексного кода образуется при классификации по характеру выпускаемых документов (текстовые, графические и прочие).

#### Классификация характеру выпускаемых документов. Коды:

- 1 - САПР текстовых документов;
- 2 - САПР графических документов;
- 3 - САПР документов на машинных носителях;
- 4 - САПР документов на фото носителях (микрофильмы, фотошаблоны и т.д.);
- 5 - САПР на выпуск документов двух типов;
- 6 - САПР на выпуск документов на носителях более, чем двух типов. **Седьмой**

**знак** комплексного кода образуется при классификации по количеству выпускаемых документов. Количество выпускаемых документов характеризует производительность системы.

### Классификация по количеству выпускаемых документов.

Коды:

1 - низкая производительность (до 100000 документов в год, на формате А4);

2 - средняя производительность (до 1000000 документов в год, на формате А4);

3 - высокая производительность (свыше 1000000 документов в год на формате А4).

**Восьмой знак** комплексного кода образуется при классификации по количеству уровней в структуре технического обеспечения.

### Классификация по количеству уровней в структуре технического обеспечения.

Коды:

1 - одноуровневые САПР;

2 - двухуровневые САПР;

3 - трехуровневые САПР.

Одноуровневые САПР устанавливаются на одной ЭВМ и образуют автономное АРМ.

Двухуровневые системы организуются для сложных, многоэтапных САПР. На автоматизированных рабочих местах выполняются отдельные этапы проектирования. АРМы объединены в сеть и работают под управлением сервера.

Роль сервера выполняет мощная ЭВМ с большим быстродействием. Сервер выполняет следующие функции:

- управляет процессом проектирования;
- решает наиболее сложные задачи с большим объемом вычислений;
- содержит базы данных и выполняет поиск по запросам,
- поступающим со второго уровня, т. е. работает в архитектуре "Клиент - сервер".

Трехуровневая система используется для очень сложных САПР и образуется при объединении двухуровневых САПР, причем на верхнем уровне используется мощная мейнфреймовая ЭВМ.

Сейчас на базе двух- и трехуровневых систем начинают функционировать, так называемые, виртуальные подразделения. Конструкторы, расчетчики и технологи могут обмениваться информацией на основе удаленного доступа через Интернет, т. е. пользователи географически разделены и могут находиться в разных странах.

## 1 МЕСТО САПР-ТП В СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЯ

### 1.1 Место САПР ТП в системе технологической подготовки производства

Для подготовки предприятия к выпуску новой продукции необходимо выполнить комплекс работ. Эти работы называют технической подготовкой производства. Техническую подготовку производства делят на 3 части (Рис.1.1):

- Конструкторская подготовка (разработка чертежей нового изделия).
- Организационная подготовка (календарное и технико-экономическое планирование).
- Технологическая подготовка.



*Рисунок 1.1 - Структура технической подготовки производства*

Технологическая подготовка производства (ТПП) представляет собой комплекс работ, направленных на подготовку производства к выпуску новых изделий по имеющимся чертежам, программе выпуска, срокам.

### 1.2 Основные задачи ТПП

Рассмотрим основные задачи технологической подготовки производства.

Обеспечение технологичности конструкции изделий. Для решения этой задачи проводятся: структурный анализ изделий (какие детали и сборочные единицы входят в изделие) с целью определения возможности увеличить количество заимствованных деталей (в том числе и стандартных); технико-экономический анализ производства (какие технологические процессы и средства технологического оснащения можно использовать из процессов и средств подготовки технологически подобных и уже запускавшихся изделий); анализ возможности улучшения технологичности конструкции деталей.

Технологичность по ГОСТ 18831-73 рассматривается как совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте, по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения при обеспечении установленных значений показателей качества в принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Анализ возможности улучшения технологичности конструкции деталей включает в себя анализ возможности: уменьшения размеров обрабатываемых поверхностей для снижения трудоемкости механической обработки; повышения жесткости детали для обеспечения ее многоинструментальной обработки и высокопроизводительных режимов резания; облегчения подвода и отвода режущих инструментов в целях сокращения вспомогательного времени; унификации размеров отверстий, пазов и канавок для сокращения номенклатуры инструментов; обеспечения удобного и надежного базирования заготовок, а при простановке размеров анализ возможности совмещения технологических и измерительных баз; анализ удобства выполнения многоместной обработки заготовок.

Показатели для оценки технологичности конструкции учтены требованиями ГОСТ 14.201-73. Технологичность конструкции – понятие относительное и комплексное. При ее оценке следует учитывать условия производства (тип, уровень автоматизации и оснащенности), ее нельзя

рассматривать изолированно, без взаимосвязи и учета условий выполнения подготовительных процессов, процессов обработки, сборки и контроля. Отработку на технологичность конструкции производят в целях получения наименьших трудоемкости и себестоимости изготовления изделия в целом.

Улучшение технологичности конструкции позволяет сократить трудоемкость изготовления изделия на 15–30 % и более, а себестоимость на 10–20 %. Для отдельных деталей эти показатели могут быть выше.

Понятие «технологичность конструкции» распространяют не только на область производства, но и на процесс его подготовки. Конструкция изделия должна быть удобной для быстрого освоения его в производстве, а также для эксплуатации его потребителем (удобство обслуживания, ремонтпригодность, экономичность эксплуатации).

Конструкцию изделия рекомендуется отрабатывать на технологичность в процессе создания самой конструкции. При этом достигается рабочий контакт конструкторов и технологов, сокращается длительность последующей разработки технологических процессов.

Разработка технологических процессов (ТП). Цель проектирования ТП – подробное описание процессов изготовления изделия с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованиями принятого варианта. Эта основная задача технолога дополняется задачей внедрения спроектированного технологического процесса на предприятии. В результате составления технологической документации инженерно-технический персонал и рабочие-исполнители получают необходимые данные и инструкции для осуществления спроектированного технологического процесса в конкретных производственных условиях.

Технологические процессы разрабатывают при проектировании новых и реконструкции существующих заводов, а также при организации производства новых изделий на действующих заводах. Кроме того, ТП корректируют или разрабатывают новые ТП на действующих заводах при выпуске уже освоенной продукции. Это обусловливается конструктивными усовершенствованиями

выпускаемых изделий и необходимостью использования и внедрения в действующее производство передовой технологии и новейших достижений производственной техники.

При проектировании новых и реконструкции существующих заводов разработанные ТП берутся за основу проекта. Они определяют необходимое технологическое оборудование, производственные площади и энергетические мощности цеха, его транспортные средства, число рабочих, основные и вспомогательные материалы. На основе спроектированного ТП устанавливают исходные данные для организации снабжения цеха, календарного планирования, технологического контроля, инструментального и транспортного хозяйства, решают вопросы организации, экономики и управления цехом. От качества технологических разработок зависят технико-экономические показатели завода.

При организации производства новых изделий на действующем заводе разработка ТП предшествует всем подготовительным и организационным работам. На основе ТП выявляют возможности использования имеющегося оборудования и необходимость приобретения нового, определяют требующуюся дополнительную рабочую силу, количество инструмента, средств технического контроля, транспортных средств, материалов, энергии.

Задача проектирования ТП характерна многовариантностью возможных решений. Даже для сравнительно простых изделий может быть разработано несколько различных ТП, полностью обеспечивающих требования рабочего чертежа и технических условий. Сопоставляя эффективность и рентабельность этих вариантов, окончательно отбирают один или несколько равноценных вариантов.

Из этих нескольких возможных вариантов сначала отбирают такие, производительность которых не ниже заданной. Затем выбирают наиболее рентабельный вариант, обеспечивающий минимальную себестоимость изготовления изделия.

Проектирование ТП отличается сложностью и трудоемкостью. Его



выполняют за несколько последовательных стадий. Вначале делают предварительные наброски при решении частных и общих вопросов проектирования; на последующих стадиях эти наброски уточняют и конкретизируют на основе детальных технологических расчетов. Знание основных закономерностей построения ТП и математические методы позволяют находить оптимальные решения с помощью методов автоматизированного проектирования.

Основные трудности оптимизации решения сложных технологических задач – наличие большого количества влияющих факторов и отсутствие точных закономерностей протекания технологических процессов.

Проектирование и изготовление средств технологического оснащения (СТО). К СТО относятся станочные приспособления, режущие, измерительные и вспомогательные инструменты.

Проектирование технологической оснастки включает в себя решение задач конструкторского и технологического характера. Основные направления автоматизации решения этих задач: типизация конструктивных и технологических решений; отделение проблемной части от инвариантной; создание банков данных конструкторско-технологического назначения; использование диалоговых методов проектирования. На этой основе разрабатываются специальные подсистемы автоматизированного проектирования технологической оснастки. Известны подсистемы проектирования штампов, литейных форм, приспособления для сверления плоских деталей, фотошаблонов, печатных плат, режущего, измерительного и вспомогательного инструментов и др.

### 1.3 Функции и средства автоматизации ТПП

Рассмотрим ТПП как объект автоматизации. Автоматизировать ТПП – это в комплексе автоматизировать следующие ее функции (рис. 1.2):

- анализ и обеспечение технологичности конструкции изделий;
- технологический анализ производства;

- проектирование ТП
- проектирование средств технологического оснащения (СТО);
- подготовку управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ;
- нормирование труда и материалов;
- проектирование участков, цехов;
- планирование ТПП и управление процессом ТПП;
- изготовление СТО.

По своим свойствам функции неоднородны и автоматизируются с использованием различных методов и средств.



Рисунок 1.2 - . Функции и средства автоматизации ТПП

На рис. 1.2 указаны основные системы, с помощью которых реализуется автоматизация функций ТПП. К средствам автоматизации относятся ИПС – информационно-поисковые системы; САПР ТП– системы автоматизированного проектирования ТП, СТО, цехов; САП – система автоматизированного программирования управляющих программ для станков с ЧПУ; САН – система автоматизированного нормирования; АСУ – автоматизированная система

управления ТПП. Все эти системы входят в состав АСТПП – автоматизированной системы ТПП – и являются ее подсистемами.

ТПП в системе технической подготовки производства занимает 30-40% от всего комплекса работ в мелкосерийном производстве, и 50-60%—в массовом производстве. Учитывая долю ручного проектирования, автоматизированное проектирование ТП в ТПП составляет примерно 25% от комплекса всех работ в ТПП.

#### 1.4 Функции и задачи технологической подготовки производства

Основные функции ТПП: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки.

Исходными данными для составления программ для станков с ЧПУ являются результаты конструкторского проектирования, поступающие из САД. Но возможно программирование и при наличии в качестве исходных данных лишь чертежа детали и параметров технологического процесса.

При программировании определяют и кодируют геометрию заготовки, траектории движения подвижных органов станка и параметры обработки. Для этих целей используют специализированные языки, примером которых может служить язык АРТ (Automatically Programmed Tools), относящийся к языкам высокого уровня. В языке АРТ имеются следующие группы команд:

- идентифицирующие — для указания названия обрабатываемой детали и типа используемого постпроцессора;
- геометрические — для указания геометрических особенностей детали;
- управляющие перемещениями режущего инструмента;
- управляющие режимами обработки (определяющие скорость подачи,

скорость вращения шпинделя, включение охлаждения и т.п.);

– дополнительные (например, выбор инструмента).

Примеры команд АРТ:

*P5 = POINT/0.0. 2.5. 0.4 — задание точки P5 с координатами X=0, Y=2,5, Z=0,4.*

*GOTO/P7 — перемещение в точку P7.*

*FEDRAT/6.0 — задание скорости подачи 6 дюйм/мин.*

Полученный исходный код на языке АРТ преобразуется в программу перемещений инструмента, управления подачей и т.п., представляемую в виде аппаратно независимого файла CLData (Cutter Location Data). Файл CLData поступает в постпроцессор, который переводит программу на язык, требуемый для конкретного типа контроллера. Этими языками пользуются не профессиональные программисты, а заводские технологи, поэтому желательно, чтобы языки были достаточно простыми, построенными на визуальных изображениях ситуаций. Во многих системах дополнительно используются различные схемные языки. Ряд языков стандартизован и представлен в международном стандарте ИЕС 1131-3.

Особое место в системах занимает процедура прототипирования — изготовления прототипов деталей или шаблонов, по которым детали будут изготавливаться. Прототипирование — непосредственная реализация разработанной геометрической модели.

Для прототипирования широко используется стереолитография, основанная на построении трехмерного объекта из ряда слоев фотополимера, избирательно отверждаемого при облучении.

Процесс стереолитографии реализуется с помощью установки, в которой имеется ванна с жидким полимером и вертикально перемещаемая платформа. Платформа при формировании очередного слоя прототипа располагается ниже поверхности жидкого полимера на толщину одного слоя. Луч лазера перемещается по участку поверхности, повторяющему форму сечения прототипа. Этот участок затвердевает. Последовательно слой за слоем, начиная с нижнего слоя, формируется твердый прототип.

Процесс стереолитографии может быть использован для окончательного изготовления детали, если для нее полимер является подходящим материалом.

Наряду с стереолитографией используются и другие способы прототипирования, например, ламинирование (LOM — Laminated Object Manufacturing), основанное на последовательном склеивании слоев рабочего материала, поступающего в форме рулона. В установке ламинирования лазер вырезает слой по форме требуемого сечения.

Главные особенности проектирования технологических процессов:

- Многовариантность проектных решений.
- Слабая формализация многих проектных задач.

К легко формализуемым задачам технологического проектирования относятся:

- расчет припусков и межпереходных размеров;
- расчет режимов резания;
- нормирование технологического процесса.

Решение слабоформализуемых задач основывается на типовых решениях. Это такие задачи, как выбор заготовки, разработка маршрута обработки детали, выбор станков, выбор инструментов и т.д.

Набор типовых решений и условий, при которых может быть применено каждое из них, составляют базу данных. При разработке технологического процесса в ЭВМ вводятся некоторые исходные данные по требуемой детали. После этого проверяется соответствие исходных данных условиям применимости типовых решений. При выполнении всех условий принимается соответствующее типовое решение.

Последовательность проектных процедур при синтезе технологических процессов может быть следующей:

- Ввод описания чертежа детали.
- Синтез маршрутов (планов) обработки для всех поверхностей детали.
- Синтез принципиальной схемы технологического процесса.

- Синтез маршрута обработки детали.
- Синтез состава и структуры операций технологического процесса.
- Доработка технологического процесса (расчет режимов резания, нормирование).
- Оформление документации.

### 1.5 Стадии жизненного цикла изделия

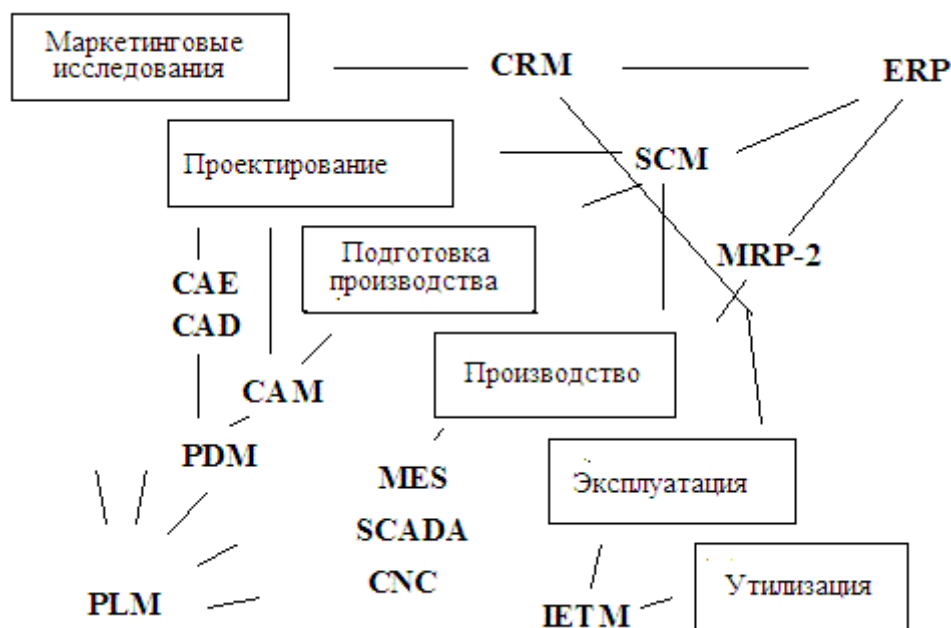
Жизненный цикл изделий (ЖЦИ) включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового продукта до его утилизации по окончании срока использования. К ним относятся этапы маркетинговых исследований, проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), собственно производства, послепродажного обслуживания и эксплуатации продукции, утилизации.

На всех этапах жизненного цикла имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение требований, предъявляемых к производимому продукту, при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики. Понятие эффективности охватывает не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижения затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требования удобства эксплуатации имеют для сложной техники, например, в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные технические изделия, оказывается невозможным без широкого использования автоматизированных систем (АС), основанных на

применении компьютеров и предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессов. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обуславливает разнообразие применяемых АС.

На рис. 1.3 указаны основные типы АС с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий.



*Рисунок 1.3 - Этапы жизненного цикла промышленной продукции и используемые автоматизированные системы*

Рассмотрим содержание основных этапов ЖЦИ для изделий машиностроения.

Цель маркетинговых исследований — анализ состояния рынка, прогноз спроса на планируемые изделия и развития их технических характеристик.

На этапе проектирования выполняются проектные процедуры — формирование принципиального решения, разработка геометрических моделей и чертежей, расчеты, моделирование процессов, оптимизация и т.п. Этап проектирования включает все необходимые стадии, начиная с внешнего проектирования, выработки концепции (облика) изделия и кончая испытаниями пробного образца или партии изделий. Внешнее проектирование обычно

включает разработку технического и коммерческого предложений и формирование технического задания (ТЗ) на основе результатов маркетинговых исследований и/или требований, предъявленных заказчиком.

На этапе подготовки производства разрабатываются маршрутная и операционная технологии изготовления деталей, реализуемые в программах для станков ЧПУ; технология сборки и монтажа изделий; технология контроля и испытаний.

На этапе производства осуществляются: календарное и оперативное планирование; приобретение материалов и комплектующих с их входным контролем; механообработки и другие требуемые виды обработки; контроль результатов обработки; сборка; испытания и итоговый контроль.

На постпроизводственных этапах выполняются консервация, упаковка, транспортировка; монтаж у потребителя; эксплуатация, обслуживание, ремонт; утилизация.

Автоматизация проектирования осуществляется САПР. В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального, конструкторского и технологического проектирования. Первые из них называют системами расчетов и инженерного анализа или системами CAE (Computer Aided Engineering). Системы конструкторского проектирования называют системами CAD (Computer Aided Design). Проектирование технологических процессов выполняется в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП), входящих как составная часть в системы CAM (Computer Aided Manufacturing).

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения, координации работы систем CAE/CAD/CAM, управления проектными данными и проектированием разрабатываются системы, получившие название систем управления проектными данными PDM (Product Data Management). Системы PDM либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать



совместно с разными САПР.

На большинстве этапов жизненного цикла, начиная с определения предприятий-поставщиков исходных материалов и компонентов и кончая реализацией продукции, требуются услуги системы управления цепочками поставок — Supply Chain Management (SCM). Цепь поставок обычно определяют как совокупность стадий увеличения добавленной стоимости продукции при ее движении от компаний-поставщиков к компаниям-потребителям. Управление цепью поставок подразумевает продвижение материального потока с минимальными издержками. При планировании производства система SCM управляет стратегией позиционирования продукции. Если время производственного цикла меньше времени ожидания заказчика на получение готовой продукции, то можно применять стратегию "изготовление на заказ". Иначе приходится использовать стратегию "изготовление на склад". При этом во время производственного цикла должно входить время на размещение и исполнение заказов на необходимые материалы и комплектующие на предприятиях-поставщиках.

В последнее время усилия многих компаний, производящих программно-аппаратные средства автоматизированных систем, направлены на создание систем электронного бизнеса (E-commerce). Задачи, решаемые системами E-commerce, сводятся не только к организации на сайтах Internet витрин товаров и услуг. Они объединяют в едином информационном пространстве запросы заказчиков и данные о возможностях множества организаций, специализирующихся на предоставлении различных услуг и выполнении тех или иных процедур и операций по проектированию, изготовлению, поставкам заказанных изделий. Проектирование непосредственно под заказ позволяет добиться наилучших параметров создаваемой продукции, а оптимальный выбор исполнителей и цепочек поставок ведет к минимизации времени и стоимости выполнения заказа. Координация работы многих предприятий-партнеров с использованием технологий Internet возлагается на системы E-commerce, называемые системами

управления данными в интегрированном информационном пространстве СРС (Collaborative Product Commerce)

Управление в промышленности, как и в любых сложных системах, имеет иерархическую структуру. В общей структуре управления выделяют несколько иерархических уровней, показанных на рис. 2. Автоматизация управления на различных уровнях реализуется с помощью автоматизированных систем управления (АСУ).



*Рисунок 1.4 - Общая структура управления*

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется автоматизированными системами управления предприятием (АСУП) и автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП).

К АСУП относятся системы планирования и управления предприятием ERP (Enterprise Resource Planning), планирования производства и требований к материалам MRP-2 (Manufacturing Requirement Planning) и упомянутые выше системы SCM. Наиболее развитые системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом

продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т.п. Системы MRP-2 ориентированы, главным образом, на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством. В некоторых случаях системы SCM и MRP-2 входят как подсистемы в ERP, в последнее время их чаще рассматривают как самостоятельные системы.

Промежуточное положение между АСУП и АСУТП занимает производственная исполнительная система MES (Manufacturing Execution Systems), предназначенная для решения оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом.

В состав АСУТП входит система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), выполняющая диспетчерские функции (сбор и обработка данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и помогающая разрабатывать ПО для встроенного оборудования. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы CNC (Computer Numerical Control) на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), которые встроены в технологическое оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ). Системы CNC называют также встроенными компьютерными системами.

Система CRM используется на этапах маркетинговых исследований и реализации продукции, с ее помощью выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые изделия.

Функции обучения обслуживающего персонала выполняют интерактивные электронные технические руководства IETM (Interactive Electronic Technical Manuals). С их помощью выполняются диагностические операции, поиск отказавших компонентов, заказ дополнительных запасных деталей и некоторые другие операции на этапе эксплуатации систем.

Управление данными в едином информационном пространстве на

протяжении всех этапов жизненного цикла изделий возлагается на систему PLM (Product Lifecycle Management). Под PLM понимают процесс управления информацией об изделии на протяжении всего его жизненного цикла. Отметим, что понятие PLM-система трактуется двояко: либо как интегрированная совокупность автоматизированных систем CAE/CAD/CAM/PDM и ERP/CRM/SCM, либо как совокупность только средств информационной поддержки изделия и интегрирования автоматизированных систем предприятия, что практически совпадает с определением понятия CALS. Характерная особенность PLM — возможность поддержки взаимодействия различных автоматизированных систем многих предприятий, т.е. технологии PLM являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют САПР, ERP, PDM, SCM, CRM и другие автоматизированные системы многих предприятий.

## 2 МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ САПР-ТП

### 2.1 Основные требования к САПР и средствам их реализации

В рамках жизненного цикла промышленных изделий САПР решает задачи автоматизации работ на стадиях проектирования и подготовки производства. Основная цель создания САПР — повышение эффективности труда инженеров, включая:

- сокращения трудоёмкости проектирования и планирования;
- сокращения сроков проектирования;
- сокращения себестоимости проектирования и изготовления, уменьшение затрат на эксплуатацию;
- повышения качества и технико-экономического уровня результатов проектирования;
- сокращения затрат на натурное моделирование и испытания.

Достижение этих целей обеспечивается путем выполнения следующих требований:

- автоматизации оформления документации;
- информационной поддержки и автоматизации процесса принятия решений;
- использования технологий параллельного проектирования;
- унификации проектных решений и процессов проектирования;
- повторного использования проектных решений, данных и наработок;
- стратегического проектирования;
- замены натурных испытаний и макетирования математическим моделированием;
- повышения качества управления проектированием;
- применения методов вариантного проектирования и оптимизации.

Основные требования к САПР связаны в основном с их эксплуатационными характеристиками, универсальностью САПР, а также

возможностью адаптации к быстроменяющимся условиям проектирования и производства. К основным требованиям относятся:

1. Простой доступ пользователя к САПР. Под простым доступом понимается возможность реализации проектной процедуры, необходимой пользователю, на основе специальных языковых средств, ориентированных на пользователя. Система автоматизированного проектирования снимает с пользователя трудоемкие задачи создания математического описания и программирования модели. Чем выше «интеллект» системы, тем более прост и лаконичен язык общения пользователя с САПР. Основой простоты взаимодействия пользователя с системой САПР является программное обеспечение. Внешне эта простота проявляется в виде соответствующих языков, ориентированных на взаимодействие пользователя с САПР.

2. Прямой доступ пользователя к САПР. Под прямым доступом понимается возможность непосредственного обращения пользователя к программно-информационным средствам САПР, иначе говоря, возможность оперативного ввода данных и отображение результатов проектирования. В подобном режиме прямого доступа пользователь может формировать и отлаживать программу, вводить новые данные, получать в виде распечаток и графических результатов проектные и расчетные операции.

Режим прямого доступа в САПР способствует исключению из технологического цикла проектирования промежуточных звеньев, позволяет сосредоточить проектные работы в одном центре. Иначе говоря, средства прямого доступа обеспечивают централизацию проектирования.

Подобная централизация резко повышает эффективность техпроцесса благодаря предельному сокращению пауз между отдельными процедурами и тем самым повышает наполненность содержательными работами и сокращает общее время технологического процесса проектирования.

Требования к пользователю САПР. Для настоящего времени будущие пользователи автоматизированного проектирования (АП) во время их профессиональной учебы недостаточно или совершенно не готовятся к работе с

САПР. Это замечание, прежде всего, относится к направленности курсов основных дисциплин, которые почти исключительно ориентированы на традиционные методы обучения или работы. Для пользователя прежде всего необходимо знание обработки данных, английского языка и дисциплины.

Все САПР ориентированы на пользователя, т. е. внутренние процессы, происходящие в САПР, остаются для пользователя в большинстве случаев скрытыми. Все же целесообразно уметь мысленно воспроизводить последовательность действий системы, что позволяет предотвращать заведомо нереалистические представления и приемы работы.

Большинство работающих сейчас систем по «происхождению» англоязычные или же создавались для экспортных поставок, и в них английский язык используется как основной. Хотя перевод системы на другие языки принципиально возможен, но с этим связан большой объем работы. Диалог между пользователем и системой происходит на простейшем английском языке, насыщенном специальными терминами АП.

Эксплуатация САПР предполагает соответствующую учебу. Содержание и объем подготовки ориентированы в каждом случае на конвейерную систему, на которой предстоит работать будущему пользователю, так как содержание и объем курса весьма специфичны, он не может являться составной частью общеобразовательной подготовки и, как правило, пользователь обучается на курсах повышения квалификации.

Универсальность программного обеспечения (ПО) и адаптация САПР к условиям проектирования. Универсальность определяется степенью инвариантности программ по отношению к проектным задачам. Универсальное программное обеспечение позволяет решать с помощью одних и тех же средств широкий круг проектных задач.

Адаптируемость и универсальность САПР подчинены по сути одним целям. Оба понятия связаны с созданием программно-информационных средств, обеспечивающих выполнение проектных работ по широкому классу изделий при различных изменяющихся условиях проектирования. Однако

адаптируемость, в отличие от универсальности, предполагает главным образом возможность включения в систему новых программных средств и расширения базиса структурного синтеза для отслеживания непредусмотренных изменений среды проектирования.

К изменениям среды относятся: смена используемой в проектировании базы, изменение конструктивов, смена технологических требований, изменение парка исполнительных автоматов, смена состава и формы конструкторской документации, появление более современных методов (алгоритмов) проектирования. Средства адаптации обеспечивают долговечность и живучесть системы.

Адаптация в современных САПР осуществляется реализацией двух основных принципов:

- модульных принципов построения структуры программного обеспечения (ПО);
- отделения данных от программы и создания самостоятельно функционирующей базы данных, связанной стандартным программным интерфейсом с программными модулями.

Модульный принцип предполагает возможность включения и выключения отдельных процедур без нарушения функционирования САПР. Это позволяет при необходимости заменить одни программные модули другими и вставить новые.

Создание баз данных является обязательным условием реализации модульного принципа, поскольку в этом случае исключение отдельной программы не нарушает целостность информационного взаимодействия программных средств. База данных в САПР является сосредоточением (библиотекой) математических модулей элементного базиса проектирования, т. е. того базиса, из которого формируются модели сложных объектов.



## 2.2 Уровни автоматизации проектных работ в САПР

Существуют три уровня автоматизации проектных работ. Уровень автоматизации САПР определяется по количеству автоматизированных процедур.

Существуют следующие уровни автоматизации САПР:

- низкоавтоматизированная - 25% проектных процедур автоматизированно;
- среднеавтоматизированная (от 25 % до 50% процедур автоматизированно);
- высокоавтоматизированная (свыше 50% процедур автоматизировано)

## 2.3 Требования к объектам проектирования в САПР

Как было отмечено, автоматизированное проектирование ТП начинается с анализа чертежа детали. После этого формируется переменная исходная (или входная) информация – информация о детали, для которой необходимо спроектировать ТП. Исходная информация может содержать также сведения о заготовке, если разработка чертежа заготовки не выполняется непосредственно перед проектированием ТП на ЭВМ.

Исходная информация может быть представлена в виде кода, таблицы кодированных сведений или на формализованном языке.

### 2.3.1 Классификация и кодирование информации о детали

Классификацией называют разделение множества объектов на подмножества на основе учета общих признаков объектов и закономерных связей между ними. Совокупность методов и правил классификации образует систему классификации.

Признаком классификации называют свойство или характеристику объекта, которые могут принимать качественное или количественное выражение, называемое значением признака классификации.

Существует два основных метода классификации: иерархический и

фасетный. При иерархическом методе заданное множество объектов последовательно разделяется на подчиненные классификационные группировки. Фасетный метод предусматривает параллельное разделение множества объектов на независимые классификационные группировки по различным признакам классификации.

С классификацией непосредственно связан процесс кодирования.

Код – совокупность знаков (символов) и система определенных правил, при помощи которых информация может быть представлена в виде набора символов для передачи, обработки и хранения.

Кодирование – преобразование информации в код.

Процесс кодирования выполняется на основе классификаторов, которые представляют собой упорядоченный перечень наименований объектов классификации, признаков классификации и классификационных группировок и их кодовых обозначений.

С целью создания единой системы конструкторско-технологической классификации деталей разработаны «Общесоюзный классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции» (ОКП) и «Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения». Процесс кодирования деталей заключается в присвоении детали цифрового кода классификационной характеристики ее конструктивных признаков, дополненного буквенно-цифровыми кодами основных технологических признаков.

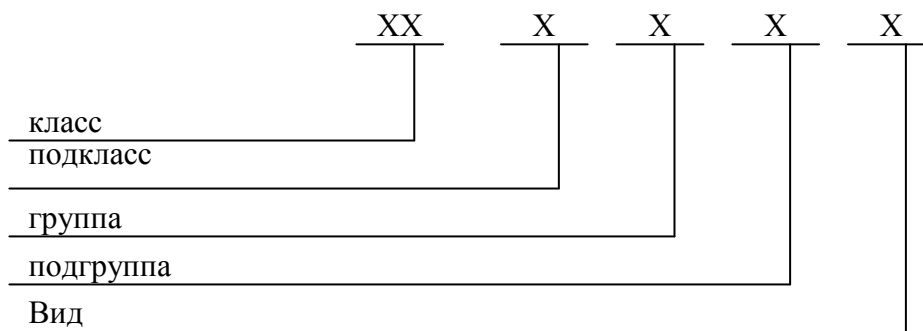
По ГОСТ 2.201-80 устанавливается следующая структура конструкторского кода, состоящего из 13 знаков:



Четырехзначный буквенный код организации-разработчика назначается

по кодификатору организаций-разработчиков.

Код классификационной характеристики присваивается по классификатору ЕСКД и имеет следующую структуру:



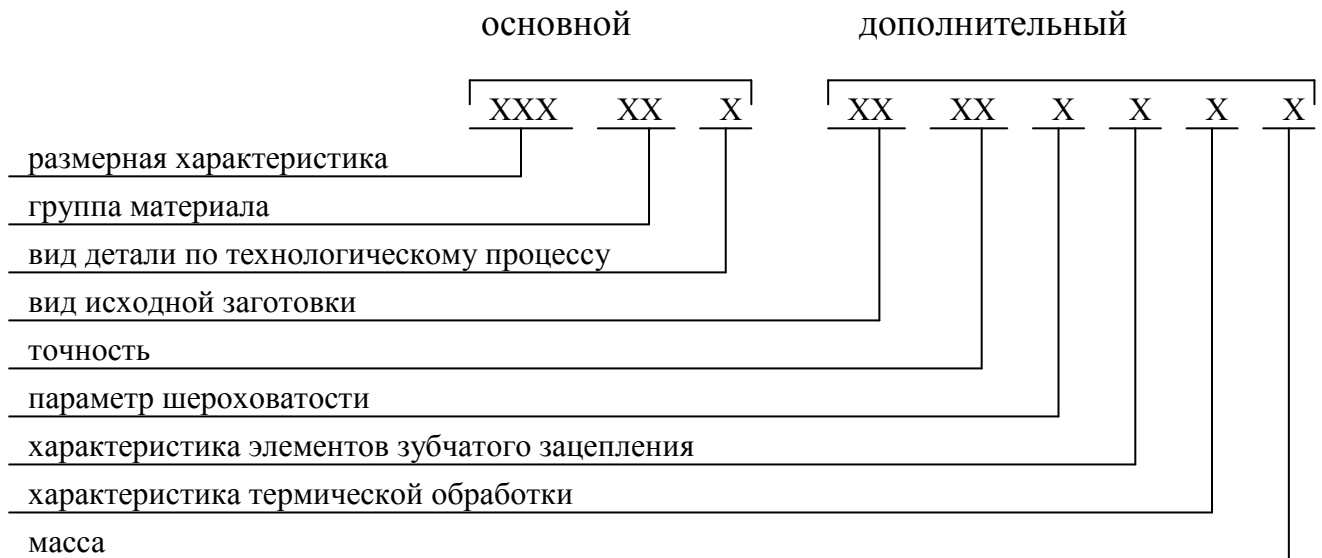
Классификатор ЕСКД содержит 99 классов. Например, класс 04 объединяет металлорежущее и деревообрабатывающее оборудование; класс 21 – приборы и устройства для измерения; для всех видов технологической оснастки предназначены классы 28 и 29.

Классы 71 – 76 содержат коды деталей машиностроения и приборостроения. При их классификации учитываются геометрическая форма, функциональное назначение, конструктивные особенности.

Класс 71 объединяет детали-тела вращения (кольца, втулки, валы). К классу 72 относятся те же детали, что и к классу 71, но с элементами зубчатого зацепления, а также трубы, разрезные секторы, сегменты и пр.; класс 73 выделен для деталей, не являющихся телами вращения (для корпусов, крышек, кронштейнов и др.); класс 74 включает те же детали, что и класс 73, но изогнутые из листов, полос и лент; в классе 75 рассматриваются детали, являющиеся телами вращения и не являющиеся ими (кулачковые, карданные, арматуры, оптические и др.); класс 76 включает детали технологической оснастки и инструмента.

По технологическому классификатору технологический код

подразделяется на основной и дополнительный и имеет следующую структуру:



Как видно из содержания, код классификационной характеристики определяет назначение и геометрию детали, а технологический код уточняет геометрию, материал, вид заготовки, термической обработки. Эти два кода объединяются как КТК–конструкторско-технологический код, и он может использоваться при проектировании ТП по аналогу для нахождения детали-аналога и при автоматизированном проектировании ТП на основе типизации.

### 2.3.2 Таблица кодированных сведений

Описание детали в виде таблицы ближе к машинной форме хранения информации. Таблица кодированных сведений (ТКС) – это несколько массивов, объединяющих информацию о различных свойствах детали. Поверхностям детали присваиваются номера от левого крайнего торца к крайнему правому торцу.

Массив представляет множество строк по числу элементарных поверхностей детали. Каждая строка состоит из столбцов, описывающих свойства поверхностей: форму, размер, точность размеров, шероховатость, относительное расположение. Посредством одной ТКС создается одна строка описания, а полное описание детали состоит из пяти разновидностей ТКС.

ТКС 1–используется однократно, содержит три столбца (ячейки):

обозначение, наименование и материал детали. Ячейки отделяются наклонной чертой «/».

ТКС 2—однократно для общих сведений о детали: твердость, точность неуказанных предельных отклонений, неуказанная шероховатость.

ТКС 3 заполняется для каждой поверхности и содержит номер поверхности, код формы поверхности, размеры поверхностей.

ТКС 4 заполняется в случае наличия у поверхности особенностей. Например, если задано отклонение расположения поверхности относительно других.

ТКС 5—при отсутствии явно заданной длины и для указания габаритной длины детали.

ТКС содержит полную информацию о детали и применяется при автоматизированном или автоматическом проектировании на основе типизации, синтеза.

### 2.3.3 Формализованный язык

Описание детали на одном из первых формализованном языке, предложенным В.Д. Цветковым, включает следующие группы данных:

- А. Наименование и обозначение детали.
- Б. общие сведения о детали.
- В. Сведения об элементарных поверхностях.
- Д. данные о форме детали.
- Е. сведения о различных связях и технических требованиях.

Описание на формализованном языке более компактно и менее формализовано, чем ТКС, т.е. позволяет произвольное представление данных. Оно содержит также полную информацию о детали и имеет такую же применимость.

### 3 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ

Современные методы проектирования базируются на понятии системного подхода, использование которого дает возможность учитывать множество факторов различной природы и характера действий, влияющих как на проектируемый объект, так и на сам процесс проектирования. Причем эти факторы не, просто констатируются, а анализируются с позиций общесистемных целей и критериев, что позволяет выделить те из них, которые оказывают определяющее влияние, и найти пути и способы наиболее эффективного воздействия на них. Другими словами, системный подход позволяет рассматривать две составные части проектирования (анализ и синтез) различные по своей природе, сложности и области применения объектов с единой точки зрения. Это позволяет выделять некоторые общие черты и закономерности их функционирования и учитывать наиболее существенные факторы.

Классический инженерно-технический подход к проектированию акцентирует внимание на функциональных и технических параметрах объектов, в то время как системный подход учитывает всю совокупность факторов, имеющих отношение к проектируемой системе. К таким факторам, помимо указанных, относятся психологические, художественно-эстетические, эргономические, социальные и многие другие. Таким образом, сущность системного подхода сводится к представлению задачи проектирования в виде многофакторной задачи с целью комплексного рассмотрения всех факторов и учета их влияния, а также нахождению путей и методов выбора оптимального варианта решения из множества возможных.

Автоматизация процессов проектирования, активно используемая практически во всех областях деятельности человека, значительно повышает роль и значение системного подхода. Система автоматизированного проектирования в широком смысле представляет собой саморегулирующуюся

человеко-машинную систему, имеющую вход (задача проектирования), выход (готовый проект, представленный, например, комплектом конструкторско-технологической документации) и механизм управления. Человек в такой системе играет роль субъекта управления. Это уже приводит к необходимости рассмотрения окружающей среды, в которой функционирует рассматриваемая система, т.е. к элементам системного подхода.

Таким образом, системный подход представляет собой методологию проектирования или научного исследования, суть которой - в рассмотрении объекта как целостной совокупности взаимосвязанных и взаимозависимых элементов.

### 3.1. История развития системного подхода

По своей сути, процесс проектирования сводится к принятию оптимальных решений на каждом этапе. Во все времена люди стремились находить в каждой конкретной ситуации наилучшие варианты разрешения имеющихся проблем. До начала XX века господствовал ситуативный подход, основанный на принятии решений в зависимости от обстоятельств. Человек (проектировщик), управленец, командир воинского подразделения), поставленный перед необходимостью выбора, опирался, прежде всего, на имеющийся опыт, талант, интуицию, в зависимости от которых он и осмысливал ситуацию. Пользуясь военной терминологией, можно сказать, что он принимал тактические решения, т.е. решения, наилучшие по отношению к конкретной ситуации. При этом подразумевалось, что в дальнейшем проблемы также будут решаться по мере их возникновения. Подобная ориентация на ближайшие (локальные) эффективные решения зачастую приводила человека в тупик, поскольку оптимальное решение в текущей ситуации может оказаться далеко не таким с точки зрения общей задачи проектирования, управления или ведения военной компании. Причина этого в том, что при изменении ситуации могут обнаружиться какие-то неучтенные ранее обстоятельства, или просто у

человека изменится взгляд на проблему. Попытки учесть это при принятии решений на новых этапах приводит к необходимости коррекции результатов уже принятых решений, а нередко и к их полной отмене. И так на каждом этапе. В конечном итоге это может привести к тому, что поставленная цель так и не будет достигнута.

Все сказанное совсем не означает, что ситуативный подход вообще не применим в проектировании. Он и применим, и оправдан, но именно как способ решения тактических задач, когда главная задача осмыслена и проработана. Другими словами, он будет эффективен в том случае, когда используется в качестве дополнительного инструмента в рамках системного подхода.

В отличие от ситуативного подхода системный подход ориентирует человека на принятие стратегических решений. Именно поэтому в последние годы он стал доминирующим во всех областях человеческой деятельности, требующих принятия решений. Его базой является теория систем - наука, изучающая структурные подобия законов, действующих в различных науках и сферах деятельности человека. Основываясь на этом, она формулирует некоторые общесистемные закономерности.

Отдельные элементы системного подхода используются человеком уже более 150 лет. Классическим примером является логический метод, который использовал английский математик Чарльз Бэббидж, когда разрабатывал общие принципы работы вычислительных машин. Решая конкретную задачу создания «разностной» вычислительной машины для составления математических таблиц, он перешел на более высокий абстрактный) уровень ее рассмотрения, взглянув на проблему с общеинженерной, общенаучной точки зрения. В результате этого ему удалось найти стратегическое решение задачи построения вычислительных машин, которое получило практическое воплощение уже в XX веке, после появления первых ЭВМ. Этот пример говорит о важности для проектировщика уметь абстрагироваться от конкретных условий решаемой



задачи, увидеть в частном общее, рассмотреть проблему в перспективе ее развития. В этом и заключаются основные идеи системного подхода.

Безусловно, любой проектировщик ограничен условиями поставленной задачи и текущим состоянием технологий своей предметной области. Системный же подход ориентирует его на преодоление в своем сознании этих ограничений. Степень такого преодоления (степень абстрактности) и определяет стратегическую правильность принимаемых решений. Чарльз Бэббидж сумел абстрагироваться от уровня развития техники своего времени, в результате чего в процессе конструирования механической вычислительной машины разработал принципы построения электронных вычислительных машин.

Чарльз Бэббидж (Charles Babbage), английский математик и инженер, родился 26 декабря 1791 года в Лондоне. Он с детства интересовался естественными науками, и еще до окончания Кембриджского университета опубликовал ряд работ по математике и физике. В 1822 году Бэббидж опубликовал работу, удостоенную первой золотой медали Астрономического общества, которая называлась «Замечания относительно применения машин к вычислению математических таблиц». Первая его машина, названная «разностной», предназначалась для вычисления таблиц значений многочленов второго порядка автоматически, то есть без участия человека, что позволило бы исключить ошибки в навигации и астрономии. В 1823 году при поддержке правительства он приступил к конструированию машины, но так и не смог завершить проект. Впоследствии он пытался заинтересовать чиновников проектом новой, более мощной «аналитической» машины, но финансирования уже не получил. Проекты Бэббиджа были преданы забвению. Только в 1937 году были найдены его записки с изложением его идей. Умер Чарльз Бэббидж в Лондоне 18 октября 1871 года. В настоящее время он по праву считается изобретателем первой автоматической вычислительной машины, которая имела многие признаки современного компьютера: память для хранения чисел,

арифметическое устройство для выполнения действий над ними, устройство управления для управления последовательностью этих действий и устройство ввода-вывода. В ней была реализована идея разделения информации на команды и данные, использовалось понятие условной передачи управления и многое другое.

Основы общей теории систем разработаны австрийским биологом Людвигом фон Берталанфи. В начале 1929 году он обобщил свои взгляды на биологические организмы, как некоторые системы, в книге «Современная теория развития». В дальнейшем он обобщил системный подход на анализ процессов общественной жизни в книге «Роботы, люди и сознание» (1967 г.), а затем показал его универсальный, общенаучный характер в книге «Общая теория систем» (1969 г.).

Людвиг фон Берталанфи (Ludwig von Bertalanffy), известный биолог-теоретик, родился 19 сентября 1901 года в Вене. До 1948 года был профессором Венского университета, затем работал в различных университетах США и Канады. Занимаясь биологическими объектами, он рассматривал их организованные динамические системы. Это позволило сформулировать обобщённую системную концепцию, основная цель которой заключается в разработке математического аппарата описания различных по своей природе систем и установлении общих законов их функционирования. Умер Людвиг фон Берталанфи 12 июня 1972 года в Нью-Йорке. В настоящее время считается, что именно он первым предложил общую теорию, описывающую принципы организации живых систем. Однако, более чем за 20 лет до первых публикаций Берталанфи, русский медик-исследователь, биолог, математик, философ и экономист А.А. Богданов (Малиновский) разработал и опубликовал всеобъемлющую системную теорию, которую назвал тектологией (от греч. *tekton* -строитель). Новая наука должна была объяснить и обобщить принципы организации и законы функционирования как живых, так и неживых систем, т.е. охватить предметную область всех других наук. Почти никто из современников не понимал Богданова, поскольку он значительно опередил свое

время. Помимо этого, будучи членом партии большевиков, он не сошелся во взглядах с ее вождем В.И.

Лениным, за что все его произведения были изъяты из обращения почти на семьдесят лет.

Начиная с 30-х годов XX века, системный подход находит широкое применение, как в области технических разработок, так и в области решения социальных задач. В те годы в промышленно развитых странах были заложены основы производственных, транспортных и энергетических систем, систем связи. Совершенно очевидно, что без всестороннего рассмотрения всех факторов и последствий построения столь больших технических систем, обойтись было просто невозможно. Конечно, системный подход, применяемый в те годы, имел существенные ограничения, обусловленные недостатком научных исследований в этой области.

В настоящее время применение системного подхода стало практически повсеместным. Он является методической основой исследований и проектирования в различных областях науки, техники и деятельности человека. Самая общая расшифровка этого понятия включает в себя точную формулировку требований к решаемой задаче, набор критериев оценки качества и математический аппарат для исследований и оценки вариантов решений. Причем детальное рассмотрение физических основ реализации решений вовсе не является необходимым.

### 3.2 Основные понятия теории систем и системного подхода

Гносеологической основой (в философии гносеология - это наука, изучающая формы и методы научного познания) системного подхода является общая теория систем. Она имеет дело с проектированием и функционированием систем, которые образуются взаимодействующими, взаимосвязанными и взаимозависимыми элементами. Однозначного понятия

системы не существует. В наиболее общем виде системой называется множество элементов и связей между ними, которые образуют некоторое единство. Исходя из этого определения, можно сделать два вывода:

- окружающий нас мир является совокупностью систем;
- любая система состоит из более мелких систем (подсистем) и, в свою очередь, является частью другой, более крупной системы (надсистемы).

Технические системы и их проектирование изучается в научной дисциплине, называемой системотехникой. В ней вводится понятие сложной системы, т.е. такой системы, которая характеризуется большим числом элементов и взаимосвязей между ними.

Состав системы определяется образующими ее элементами, или компонентами - такими частями системы, представление о которых нецелесообразно разделять на более мелкие элементы в процессе проектирования.

Среди них выделяется такой элемент, от которого решающим образом зависит функционирование всех остальных элементов, а, значит, и жизнеспособность системы в целом. Это системообразующий элемент. Структура системы представляет собой некоторую устойчивую картину взаимосвязей между ее компонентами.

Системный подход к проектированию связан с необходимостью решения двух классов задач:

- анализ системы - разделение рассматриваемой системы на отдельные элементы и изучение свойств и характеристик каждого элемента;
- синтез системы - объединение элементов в единое целое, т.е. создание проекта и формирование проектных документов.

Поскольку любая система представляет собой определенным образом организованную сущность, обособленную от окружающих ее систем (внешнего мира), то существует набор материальных и нематериальных ограничений,

определяющих характер и принципы этого обособления. Он называется границами системы.

В любой момент времени система характеризуется своим состоянием - определенным набором компонентов и текущим характером взаимосвязей между ними. Состояние системы в любой момент времени определяется параметрами - величинами, описывающими определенные свойства системы в целом, отдельных ее составных частей или окружающей среды, влияющей на систему. Функционирование системы представляет собой динамический процесс перехода системы из одного состояния в другое, который определяется характеристиками трех составляющих его процессов: вход, преобразование, выход.

В качестве примера рассмотрим работу конструктора в САПР с точки зрения теории систем. Вход представляет собой техническое задание на проектирование. Преобразования - действия конструктора по формированию математической модели проектируемого изделия, расчетов ее характеристик, компьютерному моделированию и т.д. Выходом же будет являться комплект конструкторской документации. Компонентами системы служат технические средства, программное и иное обеспечение САПР, специалисты, выполняющие проектные операции, причем в качестве системообразующего элемента (субъекта процесса преобразования) выступает человек. Границы системы будут определяться с одной стороны возможностями техники и программ, а с другой стороны, опытом и способностями субъекта преобразования. Состоянием процесса является текущая степень реализации выполняемого проекта.

Исходя из сказанного, можно сформулировать первое определение системного подхода. Системный подход - это такой способ представления знаний, при котором любой объект (система) рассматривается как совокупность взаимосвязанных компонентов, имеющая вход и выход и выполняющая некоторые преобразования. Другими словами, при исследовании сложных объектов с позиций системного подхода реализуется абстракция (упрощение),

при которой исследуемый объект представляется в виде системы. Это позволяет упростить его понимание и описание.

Системный подход, как методология исследования, охватывает любые объекты и любой род деятельности, позволяя выявлять общие закономерности и взаимосвязи. Он базируется на следующих основных принципах:

1. Принцип цели: выявление предназначения системы и целей ее функционирования.

2. Принцип целостности: рассмотрение системы одновременно как единого целого, реализующего свои специфические функции в соответствии с собственными законами, и в то же время как подсистему для некоторой более сложной системы.

3. Принцип сложности: любой объект представляет собой сложную совокупность различных элементов (подсистем), образующих множественные связи между собой и с окружающей средой.

4. Принцип иерархичности строения: наличие множества (не менее двух) элементов, образующих иерархическую связь - подчинение элементов нижнего уровня элементам более высокого уровня.

5. Принцип структуризации: анализ элементов системы и связей между ними в контексте конкретной организационной структуры, свойства которой оказывают влияние, в том числе и на свойства отдельных элементов.

6. Принцип множественности: использование для описания отдельных элементов и системы в целом различных математических, экономических и других моделей с целью всестороннего изучения свойств и поведения объекта.

7. Принцип историзма: рассмотрение любого объекта производится с точки зрения того, какие этапы развития он прошел к моменту начала исследования.

8. Принцип динамизма: все свойства объекта изменяются с течением времени.

9. Принцип сходства: ранее полученные результаты изучения иных сходных объектов необходимо использовать при текущем исследовании.

Применение системного подхода к процессам исследования и проектирования предполагает реализацию определенных действий (аспектов), направленных на возможно более полное изучение объекта. Таких аспектов восемь:

1. Системно-элементный аспект: выявление всех элементов, образующих рассматриваемую систему, к которым относятся материальные компоненты, научные данные и процессы.

2. Системно-структурный аспект: получение представления о строении (внутренней организации) системы посредством выявления внутренних взаимосвязей между ее элементами.

3. Системно-функциональный аспект: определение множества функций, для реализации которых предназначены исследуемые объекты.

4. Системно-целевой аспект: выявление целей проводимого научного исследования или проектирования, а поскольку целей может быть несколько, то и взаимная увязка их между собой.

5. Системно-ресурсный аспект: определение потребностей в ресурсах (время, кадры специалистов, финансирование и т.д.), необходимых для проведения исследования.

6. Системно-интеграционный аспект: нахождение того набора свойств системы, которые определяют ее целостность и уникальность.

7. Системно-коммуникационный аспект: выявление связей исследуемого объекта с окружающей средой.

8. Системно-исторический аспект: рассмотрение объекта в динамике его развития, начиная с момента возникновения до современного состояния с учетом возможных перспектив развития.

Исходя из этого, можно дать второе определение системного подхода.

Системный подход - это определенное множество общих принципов, регламентирующих научную и инженерную деятельность по синтезу и анализу сложных объектов, основанные на специальном способе их представления, суть

которого в замене реального объекта абстрактной системой. Из этого следует, что системный подход - это, прежде всего, методика правильной постановки задачи, методология научного познания и практической деятельности, основанная на представлении любого объекта в виде целостной системы: инженерной, экономической, социальной и т.д.

### 3.3 Системный подход и инженерная деятельность

По мере развития современного общества возрастают роль и значение инженерной деятельности, особенно той ее части, которая связана с проектированием новых изделий. Понятие проектирования зародилось в начале XX века. Первые представления о нем связывались с работой чертежников, которые должны были графически точно донести замысел конструктора до специалистов на производстве. С развитием науки и техники смысл и содержание понятия проектирования расширялось. С ним связывается выполнение научно-технических расчетов параметров на чертеже и предварительные исследования будущих изделий, а затем и компьютерное моделирование.

Современное инженерное проектирование характеризуется следующими особенностями:

- большой объем обрабатываемой информации, относящейся к различным научным направлениям;
- постоянно возрастающая сложность проектируемых объектов, что приводит к необходимости формирования сложных математических моделей и применения алгоритмов инженерных расчетов, требующих больших вычислительных ресурсов;
- широкое использование компьютерного моделирования в силу высокой стоимости исправления субъективных ошибок, обнаруживаемых на завершающих этапах проектирования или в производстве;



- использование новейших результатов научных исследований и разработок и учет перспектив развития данной технической области.

Проектирование технического объекта представляет собой процесс создания и представления в требуемой форме объекта, существующего только в виде образа в сознании проектировщика. Он реализуется посредством последовательного принятия рациональных решений на всех стадиях создания объекта: от предпроектного исследования до изготовления. Укрупненная общая схема процесса проектирования показана на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Общая схема процесса проектирования

Процесс проектирования может быть разбит на ряд этапов, на каждом из которых решается определенный круг задач:

1. Научно-исследовательские работы (НИР):

- предпроектные исследования - сбор, анализ и обобщение информации о состоянии в данной области науки и техники, об изделиях и процессах, аналогичных проектируемым объектам, о состоянии рынка и т.п.;

- разработка технического задания - документа, содержащего перечень основных требований, предъявляемых к проектируемому объекту или процессу, таких как показатели производительности и экономической эффективности, надежности и безопасности, мощности, экологичности и т.д.;

- разработка технического предложения с целью поиска вариантов реализации объекта, отвечающих условиям и требованиям технического задания, а также обоснования технической и экономической целесообразности.

## 2. Опытно-конструкторские работы (ОКР):

- разработка эскизного проекта, дающего общее представление об устройстве и принципах работы объекта и его составных частей, их основных параметрах, принципиальных инженерно-технических и конструкторских решениях;

- разработка технического проекта с целью выполнения окончательных технических и конструкторских решений, дающих полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, расчета отдельных его элементов, а также подготовки исходных данных для разработки рабочей документации.

## 3. Рабочее проектирование:

- разработка рабочей документации для реализации проектируемого объекта;
- изготовление опытного образца и его испытания;

доработка конструкции объекта по результатам испытания, корректировка рабочих чертежей и технологии изготовления объекта.

Таким образом, разработка любого объекта (системы) предполагает решение задач анализа и синтеза в процессе инженерно-технической и организационной деятельности. По этой причине проектирование разделяют на два уровня:

- «внешнее» проектирование - разработка общей концепции и принципов функционирования будущего изделия, исследование его свойств и поведения на математических моделях;

- «внутреннее» проектирование - формирование рабочих документов (чертежи, спецификации, ведомости и т.д.), необходимых для изготовления изделия на производстве.

Системный подход в проектировании можно применять на любом уровне к каждому отдельно взятому этапу, к любой их комбинации и всему процессу в целом. С этой точки зрения инженерное проектирование можно

разделить на ряд последовательных шагов, по ходу выполнения которых представление о проектируемой системе изменяется в сторону последовательной конкретизации ее модели. Можно выделить шесть таких обобщенных шагов (операций):

1. Анализ проблемной ситуации.
2. Синтез возможных решений.
3. Оценка и выбор перспективного варианта из множества альтернатив.
4. Моделирование.
5. Корректировка решений по результатам моделирования.
6. Реализация решения.

В зависимости от конкретного этапа проектирования содержание данных обобщенных операций будет изменяться.

На этапе НИР анализ проблемной ситуации (первый шаг) начинается с анализа потребностей рынка, результатом которого должно стать определение множества пригодных решений поставленной инженерной проблемы.

Другими словами, определяются варианты исполнения технической системы, которые будут востребованы в определенной социально-экономической сфере.

Синтез возможных решений (второй шаг) начинается с четкого определения, формулировки и исследования проектной проблемы на основе информации, полученной на предыдущем шаге, а также информации об окружающей среде и общих инженерных принципах системы. Проектируемая система при этом рассматривается как «черный ящик», у которого есть вход, выход и законы функционирования, но содержание которого пока неизвестно. Исходя из такого допущения, определяются параметры системы, возможные ограничения функционирования и основные проектные критерии. Естественно, что в таких условиях можно «сгенерировать» множество вариантов решения проектной проблемы.

На третьем шаге из этого множества возможных альтернативных решений должны выбираются потенциально пригодные решения. Пока еще они является абстракцией, которая учитывает только основные факторы, но совсем не учитывает способы реализации, экономическую эффективность и многое другое. А ведь именно эти, «второстепенные» факторы имеют решающее значение при выяснении возможности или невозможности реализации данного решения. Оценка их влияния производится на двух последующих шагах.

На четвертом шаге определяется возможность физической реализации каждого варианта, а на пятом - из этих решений выбираются экономически рентабельные решения, а также оценивается финансовая возможность их реализации.

Реализация решения (шестой шаг) представляет собой множество пригодных решений, информация о которых оформляется в виде технического предложения.

На этапе ОКР (предварительное проектирование) фактически выбирается наилучший проектный вариант, для которого и будет детальное проектирование. На первом шаге во множестве пригодных решений определяется наиболее перспективный вариант, который и принимается за предварительное решение проектной проблемы. Этот вариант не обязательно будет окончательным, поскольку при реализации последующих шагов в нем могут обнаружиться существенные недостатки. Тогда, отбросив его, в оставшемся множестве снова определяем наиболее перспективный вариант и повторяем шаги.

Второй шаг предполагает разработку математических моделей проектируемой системы, которые будут являться не только основой выполнения всех последующих шагов данного этапа, но и использоваться при рабочем проектировании. Отметим, что использование единой математической модели изделия или процесса на всех этапах жизненного цикла называется CALS технологией проектирования.

Выполнение третьего, четвертого и пятого шагов производится параллельно, поскольку все они связаны с моделированием отдельных проектных параметров и состояний системы с целью всестороннего анализа выбранного решения. Перед переходом к этапу реализации (разработка эскизного или рабочего проекта) необходима четкая уверенность в соответствии выбранного решения поставленной проблеме и возможности его технической, экономической и финансовой реализации. Для этого выполняются следующие виды анализа и моделирования системы:

- анализ чувствительности: определение диапазона критических параметров чувствительности (минимальных входных воздействий, которые вызывают изменения выходных параметров);

- анализ совместимости: поскольку любая система состоит из подсистем и является частью надсистемы, то параметры, полученные в результате анализа чувствительности отдельных элементов, должны быть отредактированы с точки зрения их взаимной согласованности по всей структуре системы;

- анализ стабильности, или исследование поведения системы в критических ситуациях: система функционирует в динамическом режиме и необходима уверенность, что изменение параметров окружающей среды (естественно, в допустимых пределах) не станет причиной необратимых последствий;

- оптимизация проектного решения: окончательный выбор наилучшего решения среди нескольких альтернативных вариантов, показавших приемлемые результаты проведенных анализов;

- моделирование развития ситуации (иногда его называют «проекцией в будущее»): учет и анализ влияния на выбранное решение с точки зрения его развития и модернизации тенденций технического развития данной области знаний и смежных областей, а также будущих социально-экономических условий (конкуренция, изменение предпочтений потребителей и т.д.);

- анализ сложности: определение возможностей устранения излишней сложности проектного решения.

Задача рабочего (детального) проектирования - довести отработанную идею до физической реализации, т.е. разработать окончательную конструкцию системы и зафиксировать это комплектом конструкторско-технологической документации. К началу данного этапа разработана общая идея системы, определены ее структура и основные параметры, сформированы математические модели, т.е. при наличии финансов, специалистов и времени проект можно довести до производства. Исходя из этого, анализ проблемной ситуации заключается в планировании проектных работ и обосновании их бюджета.

Остальные шаги в целом соответствуют этапу предварительного проектирования, только меняются приоритеты видов анализа и понижается уровень абстрагирования (иногда это называют «проектированием в исполнительных координатах»). Например, на данном этапе анализ совместимости накладывает на проектные решения значительно более жесткие ограничения и играет более важную роль, чем анализ стабильности.

Понижение уровня абстрагирования означает, что на этапе рабочего проектирования специалист имеет дело с конкретными элементами (фурнитурой, облицовочными материалами и т.д.), которые имеют строго определенные характеристики. Результаты проектирования отдельных компонентов и системы в целом фиксируются в рабочих и сборочных чертежах, спецификациях, маршрутных и операционных картах, операционных эскизах, ведомостях и других документах. Часть этих документов формируется традиционным путем (на бумаге), другая часть - в электронном виде (например, программы для станков с ЧПУ).

Как и любой процесс проектирования, рабочее проектирование носит итерационный характер. Например, при подготовке сборочных чертежей может потребоваться коррекция рабочих чертежей отдельных элементов. Отметим, что при использовании современных САПР мебельных изделий многие шаги рабочего проектирования выполняются с высокой степенью автоматизации:

автоматически формируются комплект чертежей и спецификаций, карты раскроя материалов, смета затрат на изготовления и т.д.

Выше были рассмотрены этапы проектирования изделий и процессов, однако применение системного подхода не ограничивается только ими. Есть еще планирование производства, управление ресурсами, реализация продукции, гарантийное и послегарантийное сопровождение и множество других задач. С точки зрения системного подхода их также можно представить в виде процесса, состоящего из той же последовательности шагов. Это говорит об универсальности системного проектирования, в котором инженерная деятельность представляет собой лишь один из его аспектов, связанный с проектированием технических объектов. И в дальнейшем сфера применения системного подхода будет неуклонно расширяться.

## 4 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В САПР-ТП

### 4.1 Понятие математического моделирования

**Математическая модель** представляет собой упрощенное описание реальных объектов с помощью математических понятий. Различие между объектом и моделью состоит в том, что любой объект обладает определенным набором характеристик, т.е. он моделирует часть окружающей нас действительности и таким образом существует во времени и пространстве (например, станок или мебельный ансамбль). Для исследования структуры, параметров или поведения объекта строится его модель, которая, как правило, не может описать объект полностью, поскольку реальные объекты слишком сложны. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо отобрать именно те характеристики объекта, которые важны для решения именно этой задачи, т.е. абстрагироваться от некоторых несущественных деталей объекта.

**Абстракция** – это прием, при помощи которого выделяются существенные характеристики некоторого объекта, отличающие его от всех других видов объектов, т.е. определяются его концептуальные границы с точки зрения исследователя.

Процесс построения и исследования математических моделей реальных процессов и явлений называется **математическим моделированием**. Поскольку практически все естественные и общественные науки используют математический аппарат, то все они, по сути, занимаются математическим моделированием, т.е. заменяют реальный объект его моделью, после чего изучают именно модель. Если процесс изучения моделей выполняется на компьютере, то говорят о **компьютерном моделировании**.

Перечислим основные свойства математических моделей:

- модель универсальна, с помощью одной и той же математической



модели можно описывать принципиально разные реальные явления, поэтому, изучая некоторую модель, мы фактически изучаем целый класс описываемых ею объектов или явлений;

- модель существует совместно с некоторыми материальными объектами или явлениями (процессами), которые она замещает в процессе их исследования или проектирования;
- модель всегда проще объекта, поскольку получается путем абстрагирования, поэтому для одного объекта используется совокупность моделей, которые отражают различные стороны (абстракции) его описания, аспекты поведения, этапы эволюции в процессе проектирования или функционирования;
- модель может формироваться как в результате изучения и описания некоторых объектов (для естественных, существующих объектов, например, модель солнечной системы), так и в процессе проектирования новых объектов и процессов (например, модель мебельного ансамбля);
- модель формируется не ради ее самой, для того, чтобы в процессе исследований заменять ею реальные объекты и процессы.

Таким образом, можно сказать, что модель – это инструмент и результат исследования, а моделирование – процесс исследования реальных объектов путем их замены математическими моделями, отражающими те или иные существенные характеристики.



Рисунок 4.1. Способы получения информации об объекте

Получить необходимую информацию об объекте можно двумя способами (рис. 4.1):

- путем экспериментальных исследований объекта или его физической модели;
- методами математического моделирования, когда формируются математические модели всех деталей и выполняется виртуальная сборка на экране монитора.

Использование математического моделирования имеет целый ряд преимуществ:

- оно значительно дешевле, поскольку нет необходимости изготавливать объекты, а сложные, дорогие и длительные физические исследования реальных объектов или процессов (которые иногда просто невозможно осуществить, например, исследовать перспективы таяния льдов на Северном полюсе) заменяются значительно более простыми, дешевыми и быстрыми исследованиями моделей;
- над моделями можно выполнять любые виды экспериментов, в том числе с предельными значениями параметров, не опасаясь непредсказуемых последствий;
- модель доступна в любое время, она не разрушается в процессе исследований;
- модель позволяет исследовать гипотетические, т.е. нереализованные в природе объекты, а также опасные или труднопроизводимые процессы (например, работу ядерного реактора в критическом режиме);
- модель позволяет изменять масштаб времени (ускорять или замедлять процессы).

Основной недостаток математического моделирования определяется тем, что модель создается при помощи абстракции. Это неизбежно приводит к потере точности получаемых результатов. Однако разработчик модели может контролировать и оценивать эти потери, т.к. точно знает те допущения,

которые он использовал.

Методы математического моделирования позволяют решить две основные научно-технические задачи: исследование реальных объектов и процессов (задача анализа) и проектирование новых объектов и процессов (задача синтеза). Общая схема реализации математического моделирования с использованием компьютеров приведена на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 - Общая схема компьютерного моделирования

#### 4.2 Требования к математическим моделям в САПР

Математические модели, используемые в САПР, должны обеспечивать возможности моделирования всей номенклатуры проектируемых объектов и

процессов, а также адаптации к изменяющимся условиям производства и эксплуатации. Для этого к ним предъявляются следующие основные требования:

- высокая степень универсальности;
- адекватность;
- достаточная точность получаемых результатов;
- максимальная экономичность.

Эти требования взаимно противоречивы. Например, высокая степень адекватности и точности модели достигаются за счет ее усложнения, что, в свою очередь, ухудшает экономичность. Повышение универсальности модели приводит к невозможности учета некоторых специфических факторов, а это означает снижение адекватности получаемых результатов. Компромиссное решение достигается за счет использования различных математических моделей, выбор которых определяется особенностями моделируемых объектов и процессов.

**Универсальность** математической модели определяется полнотой отражения в ней свойств реального объекта, поскольку модель отражает не все, а лишь некоторые его свойства. Таким образом, универсальность определяется уровнем абстрагирования при построении модели. При выборе методов (алгоритмов) моделирования в САПР в первую очередь определяются области их применения. Чем шире область применения, т.е. чем шире круг решаемых в рамках данного метода задач, тем более универсальным является выбранный метод.

Под **адекватностью** математической модели понимается ее способность отражать заданные свойства объекта с допустимой погрешностью. Она оценивается перечнем отражаемых свойств и **областями адекватности** – таким множеством параметров, в пределах которого погрешности модели не выходит за допустимые пределы. Это означает, что адекватность модели имеет место только в ограниченной области изменения внутренних и входных параметров. Допустим, что при моделировании

некоторой кривой на плоскости, описываемой нелинейным уравнением, была применена *линеаризация*, т.е. замена кривой ломаной линией.

**Точность** математической модели оценивается степенью совпадения значений выходных параметров реального объекта и соответствующих значений, полученных в процессе моделирования.

**Экономичность** математической модели при компьютерном моделировании характеризуется затратами вычислительных ресурсов на ее реализацию, основными из которых являются время процессора и объем памяти. Однако эти параметры компьютера больше характеризуют сам компьютер, а не математическую модель, поэтому использовать их для оценки экономичности, а тем более для сравнения экономичности различных моделей, невозможно. По этой причине для оценки экономичности самой математической модели используют такие показатели, как среднее количество операций, выполняемых при одном обращении к математической модели, размерность системы уравнений в математической модели, количество и размерность используемых в модели внутренних параметров и ряд других.

#### 4.3 Виды математических моделей

Классификация имеет важное значение в любой области научной и практической деятельности человека. Она дает возможность обобщить накопленный опыт, систематизировать и упорядочить понятия предметной области. Математическое моделирование не является исключением. Существует целый ряд критериев, в зависимости от которых классифицируются математические модели. Рассмотрим некоторые из них применительно к объектам и процессам деревообработки и мебельного производства.

В зависимости от характер отображаемых свойств объекта модели подразделяются на структурные и функциональные. **Структурные модели** предназначены для отображения структурных свойств объектов, например,

маршрутного технологического процесса изготовления мебельного изделия. В отличие от них **функциональные модели** служат для описания информационных и физических процессов, которые реализуются на конкретном оборудовании при выполнении операций и переходов, предусмотренных технологическим процессом: раскрой листовых материалов, обработка кромок деталей, сверление отверстий под установку фурнитуры и т.д.

По способу представления свойств объекта модели бывают аналитическими, алгоритмическими и имитационными. **Аналитические модели** представляют собой явные математические зависимости выходных параметров от входных и внутренних параметров. Примером могут служить выражения, используемые для расчетов режимов резания в зависимости от обрабатываемого материала, используемого инструмента и других параметров. Аналитическая модель всегда представляется определенной функциональной зависимостью и набором ограничений, которые можно проанализировать с помощью некоторого математического аппарата. Например, при использовании математического программирования для определения максимальной производительности технологической системы аналитическая модель состоит из целевой функции, которая связывает производительность с параметрами (техническими характеристиками) системы, и набора ограничений – предельных значений тех параметров, которые могут изменяться (варьироваться) при решении задачи.

Аналитические модели представляют собой эффективный инструмент расчета и оптимизации параметров технологических систем и техпроцессов, которые в них протекают. Однако для реальных систем количество параметров, которые необходимо использовать при моделировании, нередко бывает столь значительным, что решение поставленной задачи становится затруднительным. В таких случаях говорят, что задача имеет большую размерность. Подобные задачи возникают, например, при оптимизации работы автоматических линий или роботизированных производственных участков. В

этом случае используются два основных приема уменьшения размерности задачи. Первый прием связан с разбиением задачи большой размерности на задачи меньшей размерности. Разбиение производится таким образом, чтобы последовательность решения новых задач в конечном итоге приводила к решению основной задачи. Другой прием – это рассмотренное выше абстрагирование, т.е. уменьшение точности моделирования за счет упрощения модели, отказа от рассмотрения некоторых зависимостей и параметров системы.

Аналитические модели широко используют для описания геометрических параметров объектов в САПР. Среди них выделяют подмножество *канонических моделей*, которые используются в тех случаях, когда можно определить набор параметров, полностью определяющих форму объекта и его положение в пространстве. Например, если рассматривать цилиндр, то его форма определяется радиусом образующей окружности и высотой, а положение в пространстве – координатами точки, принадлежащей одному из оснований, и косинусами углов наклона оси цилиндра к координатным осям (направляющими косинусами).

Для геометрического моделирования в САПР применяются три вида математических аналитических моделей: каркасные, поверхностные и твердотельные.

В *каркасных моделях* форма объекта представляется набором линий и конечных точек, т.е. в виде так называемой проволочной модели. Математическим описанием в них являются уравнения прямых или кривых линий и координаты точек, которые могут дополняться сведения о связности (принадлежности точек кривым) и взаимных пересечениях. Такие модели легко создаются и являются очень простыми. Однако они имеют весьма серьезные недостатки с точки зрения использования в САПР, основным из которых является отсутствие сведений о поверхностях. Следствием этого является невозможность расчета объема и массы, а также всех связанных с ними параметров, невозможность определения траекторий движения

инструмента при обработке и многое другое. Помимо этого каркасным моделям свойственна неоднозначность формы того тела, которое они моделируют. В современных САПР каркасные модели уже не используются.

Математическое описание *поверхностных моделей* включает в себя не только сведения о линиях и конечных точках, но и о поверхностях, ограничивающих моделируемое тело. Формировать поверхностные модели значительно сложнее, чем каркасные, зато они имеют важные преимущества, связанные с возможностью реалистичной визуализации моделируемых объектов и траекторий движения режущего инструмента при их обработке.

Математическое описание *твердотельных моделей*, помимо сведений о поверхностях, которые ограничивают моделируемое тело, содержат информацию о том, как расположены точки пространства относительно него: внутри, вне или на границе. Твердотельные модели предназначены для работы с замкнутыми объемами и не допускают наличия поверхностей, которые не образуют тело. В настоящее время это наиболее распространенные виды моделей в САПР. К их достоинствам следует отнести максимальное соответствие реальным объектам, возможность расчета всех объемных и массовых характеристик, моделирование технологических операций и переходов со съемом материала. Однако эти модели имеют высокую сложность и трудоемкость ввода полного математического описания.

Для использования твердотельных моделей в САПР разработаны специальные методы и функции, имитирующие работу с физическими объектами без использования прямого математического описания.

*Алгоритмическая модель* определяет взаимосвязи между выходными, внутренними и внешними параметрами в виде *алгоритма* – последовательности вычислений, при выполнении которых на компьютере исходные данные преобразуются в выходные параметры. Алгоритмическая модель представляет собой некоторую систему уравнений и выбранный алгоритм ее численного (приближенного) решения.

*Имитационные математические модели* можно считать частным



случае алгоритмических моделей. Они предназначены для моделирования (имитации) физических и информационных процессов в исследуемом объекте во времени при заданных внешних воздействиях на него. Имитационные модели представляют собой описание, структурно подобное исследуемому объекту. Другими словами, каждый существенный с точки зрения задачи моделирования элемент объекта имеет свой аналог в математической модели, а сама модель описывает законы функционирования отдельных элементов и связей между ними.

Работа с имитационной моделью заключается в проведении имитационного эксперимента. Важной особенностью имитационного моделирования является возможность управления течением времени, поскольку эксперимент проводится в системном времени, которое имитирует реальное время.

Для решения достаточно широкого класса задач применяется метод моделирования, идея которого заимствована у живой природы, – *генетические алгоритмы*. Согласно эволюционной теории жизнь на Земле вначале возникла в самых простейших ее формах – одноклеточных организмов. Они постепенно усложнялись, приспосабливались к окружающей среде и порождали новые виды, пока, наконец, через миллионы лет не появился человек. С математической точки зрения можно сказать, что при помощи эволюции природа оптимизирует живые организмы. Для этого у нее есть два биологических механизма: естественный отбор и генетическое наследование, действие которых приводит к тому, что биологические виды с течением времени улучшают свои качества для того, чтобы выжить, т.е. наилучшим образом приспособиться к окружающей среде. Использование генетических алгоритмов состоит в организации эволюционного процесса, конечной целью которого является получение оптимального решения некоторой сложной задачи.

Разработчик генетических алгоритмов создает искусственный мир (популяцию), который населяет множеством особей. Каждая особь

соответствует некоторому решению поставленной задачи. Как и в живом мире, считается, что чем более приспособлена особь к окружающей среде (дает большее значение целевой функции), тем лучшему решению она соответствует. Исходя из этого, поиск наилучшего решения сводится к поиску наиболее приспособленного существа.

Поскольку сложная задача может иметь множество решений, то размер популяции может быть очень большим, т.е. одновременно заселить виртуальный мир всеми особями невозможно. Поэтому формируется некоторая начальная популяция и запускается эволюция, т.е. механизмы естественного отбора и генетического наследования. Целью эволюции является формирование наиболее приспособленных особей, которые и будут соответствовать наилучшим решениям. Эволюция является бесконечным процессом, в ходе которого особи все лучше и лучше приспособляются к окружающей среде. Если в некоторый момент эволюцию остановить и выбрать наиболее приспособленную особь в данном поколении, то она будет соответствовать решению, близкому к оптимальному.

Впервые генетические алгоритмы были применены к решению оптимизационных задач в середине 70-х годов прошлого века. Сегодня они с успехом используются многих сложных задач, когда применение традиционных математических методов невозможно или крайне затруднено.

По способу получения математической модели они подразделяются на теоретические и эмпирические. *Теоретические математические модели* создаются в результате исследования объектов или процессов на теоретическом уровне и последующего определения соответствующего математического описания. Например, на основании физических законов можно получить математические выражения для расчета сил резания. *Эмпирические математические модели* создаются в результате проведения экспериментов по изучению внешних проявлений свойств объекта с помощью измерения его входных и выходных параметров, которые затем обрабатываются методами математической статистики. Объект в этом случае

рассматривается как черный ящик без анализа происходящих в нем физических процессов.

Исходя из особенностей поведения объекта, выделяют детерминированные и вероятностные модели. *Детерминированные модели* описывают поведение объекта в том случае, когда имеется полная определенность его поведения в будущем или прошлом. Например, технологические процессы обработки деталей описываются такими моделями. В отличие от них, *вероятностные модели* позволяют учитывать влияние случайных факторов. Например, при изготовлении партии деталей на участке никогда нельзя точно определить процент брака, поскольку он зависит от многих случайных факторов. Вероятностная модель в этом случае позволит оценить наиболее вероятный размер партии деталей, удовлетворяющих заданной точности с учетом допустимых отклонений.

Классификация математических моделей по уровню абстракции, т.е. по степени подробности описания свойств объекта и формы представления взаимосвязей между параметрами, выделяет три укрупненных уровня:

- микроуровень, отражающий наиболее детальное рассмотрение свойств объекта или процесса, например, физические процессы, например, при пилении различных материалов (процессы на уровне технологических переходов);
- макроуровень, использующий представление о среде, как о дискретном (процессы на уровне маршрутной технологии, при разработке которой предполагается, что отдельные технологические операции выполняются в определенных точках производственной системы – рабочих местах);
- метауровень, использующий дискретное представление не только о пространстве, но и о времени (планирование работы производственного участка на определенный календарный период, т.е. моделирование на уровне производственной системы).

Различные уровни различаются не только степенью подробности

описания свойств объектов, но и используемым математическим аппаратом. При переходе от микро- к метеоуровню увеличивается степень подробности описания и, соответственно, размерность математической модели.

#### 4.4 Математические модели на микро-, макро- и метеоуровне

**Микроуровень** представляет собой наиболее детальное рассмотрение свойств объекта, который представляется в виде непрерывной сплошной среды. Математическими моделями технических объектов на микроуровне являются системы дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений. Независимые переменные в них – это пространственные координаты и время. Краевые условия определяют характеристики зависимых переменных в начальный момент времени и на границах рассматриваемой области.

На микроуровне моделируются поля напряжений и деформаций в деталях механических конструкций, электромагнитные поля, температурные поля нагретых деталей. Уравнения, описывающие процессы в сплошной среде, известны, однако найти их точное решение удастся только для некоторых частных случаев. В САПР решение дифференциальных и интегральных уравнений производится **численными** методами. Эти методы основаны на замене непрерывных независимых переменных конечным множеством значений в узловых точках, т.е. их дискретизации. Получаемое множество точек можно интерпретировать, как узлы некоторой сетки, поэтому они получили название сеточных методов. Точное решение математической модели в большинстве случаев невозможно, поэтому строят приближенную дискретную модель.

Двумя наиболее распространенными сеточными методами являются: **метод конечных элементов** (МКЭ) и **метод конечных разностей** (МКР).

**Метод конечных элементов** является одним из методов дискретизации, в котором непрерывная функция (температура, перемещение,

механическое напряжение и т.д.) заменяется дискретной моделью – кусочно-непрерывными функциями. Основная его идея достаточно проста: исследуемый объект (деталь, несущий элемент здания, колонна и т. д.) представляется состоящим из конечного числа отдельных элементов простой геометрической формы – конечных элементов. Их форма может быть самой различной, но главное состоит в том, что форма и размеры этих элементов остаются неизменными, они вплотную прилегают друг к другу и шарнирно закреплены в граничных вершинах. Выбор формы конечных элементов определяется условием наилучшего заполнения объекта и простотой геометрической формы. Например, для двумерного тела наиболее подходящей формой конечного элемента является треугольник, а для трехмерного – параллелепипед, пирамида, тетраэдр.

Естественно, что при таком представлении исследуемый объект должен оставаться сплошным телом, т.е. конечные элементы не являются отдельными элементами, они лишь выделяются в объекте для исследования их напряженно-деформированного состояния.

Пространственная конфигурация любой системы описывается числом степеней свободы системы, которые еще называют **обобщенными координатами**. Поскольку МКЭ является методом дискретизации, число степеней свободы построенной таким образом системы конечно. При исследовании все степени свободы собираются в матричный вектор, называемый **вектором состояния** или вектором степеней свободы. Обозначим его через  $U$ . Каждой степени свободы соответствует сопряженная переменная, представляющая собой обобщенную силу. Также объединим их в матричный **вектор силы**  $F$ .

Физический смысл этих векторов зависит от области применения МКЭ. Значение их для некоторых областей применения приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Физический смысл векторов  $U$  и  $F$

| Область применения МКЭ | Вектор состояния $U$    | Вектор силы $F$               |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Механика твердых тел   | Перемещение             | Механическая сила             |
| Теплопроводность       | Теплопроводность        | Тепловой поток                |
| Потенциальное течение  | Давление                | Скорость частицы              |
| Общий вид течения      | Скорость                | Поток                         |
| Электростатика         | Электрический потенциал | Плотность заряда              |
| Магнитостатика         | Магнитный потенциал     | Интенсивность магнитного поля |

Будем считать, что соотношение между векторами  $U$  и  $F$  является линейным и однородным. Тогда соотношение между ними можно записать в виде  $KU=F$ . Матрицу  $K$  обычно принято называть *матрицей жесткости*.

Таким образом, каждый конечный элемент можно описать его матрицей жесткости, которая устанавливает связь между узловыми усилиями и узловыми перемещениями. Значение этой матрицы определяются координатами узлов конечного элемента и свойствами материала исследуемого объекта. Точно так и сам исследуемый объект характеризуется обобщенной матрицей жесткости, которая состоит из матриц жесткости всех входящих в его состав конечных элементов. Следовательно, обобщенную матрицу жесткости объекта можно рассматривать как матрицу коэффициентов при неизвестных узловых перемещениях. Поскольку силы, действующие на объект, известны, получается система линейных уравнений, для решения которой существует большое количество методов. Решением этой системы являются перемещения во всех узлах системы, по которым можно определить внутренние усилия в самом объекте.

*Метод конечных разностей* – это один из широко известных методов *интерполяции*, который заключается в замене *дифференциальных* коэффициентов *уравнения* на разностные коэффициенты. Это позволяет свести решение *дифференциального уравнения* к решению алгебраического уравнения.

*Макроуровень* использует представление о среде как о дискретном пространстве, т.е. он предполагает такую степень детализации описания

объектов, которая позволяет рассматривать физические процессы протекающими в непрерывном времени и дискретном пространстве. Элементами этого уровня являются те объекты, которые на микроуровне рассматривались как системы. Здесь же они сосредоточены в определенных точках и связаны между собой. Например, рассмотрим материнскую плату компьютера. Макро- уровень ее описания – принципиальная схема, элементами которой являются транзисторы, резисторы, интегральные микросхемы, конденсаторы и т.д. На микроуровне были детально изучены свойства всех этих элементов, поэтому здесь они представляются точками дискретного пространства.

При формировании математических моделей на макроуровне используют два типа уравнений: компонентные и топологические.

**Компонентными уравнениями** называются уравнения, описывающие свойства элементов (компонентов) системы, а **топологическими** – их взаимосвязи в моделируемой системе. Для описания поведения системы вводится понятие **вектора фазовых переменных** – набора физических величин, полностью описывающих поведение системы на данном уровне. Различают два типа фазовых переменных: **переменные типа потенциала**; **переменные типа потока**.

Одним из основных свойств математических моделей является их универсальность, поэтому компонентные и топологические уравнения для описания систем различной природы могут иметь одинаковый вид. Таким образом, в САПР большое количество моделей и алгоритмов их исследования могут применяться для анализа систем различной физической природы, т.е. они являются **инвариантными**. Это особенно удобно при работе с системами, компоненты которых являются физически разнородными. Для графического представления подобных систем используются эквивалентные схемы.

На **метауровне** используется такая степень детализации описания сложных систем, при которой процессы, протекающие в самих системах, рассматриваются в минимальной степени. Объектами исследования на этом

уровне являются сложные устройства и комплексы, функционирование которых рассматривается как последовательность событий, происходящих в дискретные моменты времени и заключающиеся в изменении состояния элементов. Другими словами, метауровень использует дискретное представление, как о пространстве, так и о времени, а его элементами являются системы макроуровня.

Для моделирования на метауровне используются обыкновенные дифференциальные уравнения, модели массового обслуживания, логические уравнения, теорию графов. Одним из наиболее общих подходов к анализу объектов на метауровне является использование аппарата передаточных функций, примером применения которого является функциональное моделирование систем автоматического управления (САУ).

**Передаточная функция** – представляет собой один из способов математического описания динамической системы. Она представляет собой отношение преобразования Лапласа выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала при нулевых начальных условиях.

Моделирование систем на метауровне с помощью аппарата передаточных функций сводится к следующей последовательности операций:

- представление системы в виде совокупности звеньев, передаточные функции которых известны;
- формирование передаточной функции системы по передаточным функциям звеньев;
- преобразование по Лапласу входных сигналов;
- нахождение решения системы алгебраических уравнений, которое представляет собой изображения выходных сигналов;
- нахождение оригиналов выходных сигналов при помощи обратного преобразования Лапласа.

Если элемент имеет более одного входа и выхода, то вместо скалярных сигналов используются векторы.



## **5 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ**

### **5.1 Понятие о методах автоматизированного проектирования технологического процесса**

Процесс формирования ТП в общем случае – совокупность процедур структурного и параметрического синтеза с принятием и последующим анализом проектных решений. Принятие решения по каждой задаче, за исключением задач расчетного характера, производится в результате выбора известных типовых решений с учетом условий применимости. Для этого достаточно описать весь набор типовых решений, а также условий, при которых может быть выбрано каждое из решений.

По уровню решаемых задач типовые решения подразделяются на две группы: локальные и глобальные. Локальное типовое решение относится к частной технологической задаче, определяющей технологический элемент (например, модель станка при назначении станка на операцию). Глобальное типовое решение охватывает весь круг решаемых задач. Примером такого решения является типовая ТП изготовления деталей определенного типа, выбранный из множества типовых ТП.

Существуют три уровня унификации обработки: отдельной поверхности, сочетания поверхностей и детали в целом. Учитывая все перечисленные факторы: характер решаемых задач (расчетные или нерасчетные), разновидности типовых решений (локальные или глобальные), используемые уровни унификации обработки, можно выделить следующие методы автоматизированного проектирования ТП:

- 1) прямое документирование;
- 2) параметрический;
- 3) использование аналогов;
- 4) проектирование на основе типизации, или унифицированных ТП;

5) синтез.

## 5.2 Метод прямого документирования

Этот метод использует средства оформления документации, отбора информации из базы данных и предоставляет технологу следующие возможности:

- набора и корректировки текста проектного документа в специализированном редакторе;
- просмотра и распечатки данных, копирования, удаления записей по одной и блоками, нумерации переходов и операций;
- обращения к справочникам, базам данных средств оснащения, типовых текстов, нормативов;
- подключения новых справочных информационных массивов;
- формирования архива и работы с ним;
- автоматического формирования технологической документации.

Из перечня выполняемых функций видно, что уровень автоматизации очень низкий, а проектирование – трудоемкий процесс. При данном методе не требуется специальное описание информации о детали. Технолог работает с чертежом детали, как и в случае ручного проектирования, и все решения принимает сам. Данным методом можно получить ТП на любую деталь.

## 5.3 Параметрический метод

Сущность параметрического метода заключается в разделении функций между ЭВМ и человеком. Технологическое проектирование в этом случае состоит из двух этапов.

*Первый этап* – безмашинное проектирование ТП. На этом этапе вручную решаются следующие трудноформализуемые творческие по характеру задачи:

- формирование структуры ТП (технологического маршрута и последовательности переходов в операциях);
- выбор модели оборудования и методов обработки;
- выбор технологических баз, схем установки и типов при-способлений;
- установление размерной структуры ТП и технических требований на расположение поверхностей.

*Второй этап* – автоматизированное проектирование параметров ТП и отдельных операций. Он начинается с ввода в ЭВМ информации о детали (наименование, материал, твердость, покрытие и т.д.), структуре ТП (номер, наименование операций, переходов), размерной структуре. Затем в автоматическом режиме решаются следующие задачи проектирования:

- расчет припусков на обработку, операционных размеров и допусков на них;
- выбор средств технологического оснащения (режущего, вспомогательного и измерительного инструментов);
- расчет режимов резания и норм времени;
- формирование документации;
- формирование информации для АСУП.

Системы автоматизированного проектирования рассматриваемого типа легко адаптируются к производственным условиям, требуют введения небольшого объема исходных данных и легко воспринимаются технологами. С их помощью можно проектировать ТП для широкой номенклатуры деталей, включая и сложные. Однако эффективность решений в таких системах во многом зависит от квалификации технолога.

Как и в случае прямого документирования, здесь не требуется специальное описание информации о детали. Данные о детали и заготовке, необходимые для выполнения расчетов, вводятся по запросу системы в диалоговом режиме.

Системы параметрического проектирования являются автоматизированными системами низкого уровня, с которых целесообразно начинать автоматизацию технологического проектирования. Они помогают

быстрее снять так называемый психологический барьер, существующий между технологом и вычислительной техникой, отработать организацию работ на предприятии при проектировании ТП с помощью ЭВМ, создать, отладить и освоить базы данных технологического назначения.

#### 5.4 Метод использования аналогов

В основу метода использования аналогов положен принцип заимствования ранее принятых технологических решений. В процессе эксплуатации системы проектирования накапливаются типовые, групповые и единичные технологии, унифицированные операции, планы обработки конструктивных элементов и поверхностей. При формировании текущей технологии пользователю предоставлен доступ к соответствующим архивам и библиотекам, хранящим накопленные решения. Схема автоматизированного получения ТП в этом случае будет следующая: деталь → деталь-аналог → процесс на деталь-аналог → процесс на деталь.

Для нахождения детали-аналога необходимы анализ чертежа детали и определение класса, группы детали по конструктивным и технологическим признакам. Выбор детали-аналога и ТП на эту деталь производится по сформированному коду или текстовому описанию детали. ТП на деталь-аналог подвергается преобразованию на основе информационной модели текущей детали: структура ТП преобразовывается путем исключения лишних структурных элементов ТП (операций, переходов) или внесения необходимых элементов, если в ТП детали-аналога такие элементы структуры отсутствуют. Все эти действия выполняются по *методике прямого документирования*. Метод аналога чаще применяется при проектировании ТП для деталей типовых форм, отличающихся только размерами (например, одновенцовые зубчатые колеса, валы-шестерни).

Метод требует ввода информации о детали на уровне конструкторско-технологического кода. Уровень автоматизации низкий, повышается

производительность труда технолога, сокращаются сроки и трудоемкость технологической подготовки производства.

### 5.5 Метод проектирования на основе типизации

Метод проектирования на основе типизации и метод использования аналогов называют также методом анализа, или адресации. После ввода описания детали находится технологический процесс на аналогичную деталь или унифицированный ТП на комплексную деталь. Комплексная деталь – это абстрактная деталь, включающая все поверхности деталей, входящих в группу подобных деталей. Далее для формирования индивидуального ТП необходимо организовать вторую процедуру – анализ и доработку найденного аналогичного или унифицированного ТП на комплексную деталь в соответствии с чертежом текущей детали. В методе типизации используются все три уровня унификации обработки, и метод воплощает идею «от общего к частному».

Проектирование на основе унифицированных ТП является основным методом проектирования ТП при эксплуатации гибких производственных систем. Применение этого метода дает наибольший эффект при наличии на производстве групповых и типовых ТП, т.к. метод не нарушает существующей специализации производственных подразделений, упрощает процесс проектирования САПР, не требует трудноформализуемых процедур синтеза новых структур.

### 5.6 Метод синтеза

Этот метод используется для оригинальных деталей. Его нельзя причислить к методам, значительно сокращающим трудоемкость проектирования, но вместе с тем его использование оправдано в случаях изготовления уникальных для данного производства деталей. Базу метода составляют локальные типовые решения. Технологический процесс в целом

формируется (синтезируется) из решений частных задач, определяющих элементы ТП. Частные задачи решаются по-разному: в *диалоге* (автоматизированное проектирование) или по алгоритмам из базы знаний *экспертной системы*. Это деление определяется уровнем участия человека при принятии решения в процессе проектирования. При диалоговом проектировании технолог все определяющие решения (о структуре и параметрах ТП, операций, переходов, об оборудовании и оснащении) принимает самостоятельно, а ЭВМ оказывает ему методическую, организационную и информационную помощь.

Метод прямого документирования, параметрический и, как видно уже из названия, синтез ТП относятся к группе методов проектирования синтезом. В этих случаях ТП создается, составляется, синтезируется из типовых решений либо с использованием, либо без использования баз знаний.

## **6 ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Автоматизированное проектирование ТП на базе современных информационных технологий требует существенного изменения принципов построения САПР ТП и ведет к созданию САПР ТП нового поколения. Перспективы развития таких САПР ТП целесообразно рассмотреть по следующим направлениям:

- системное;
- методическое;
- функциональное;
- информационное;
- программно-математическое;
- организационное.

*Системное направление.* В системном плане САПР ТП рассматривается как подсистема ТПП, поэтому необходимо разрабатывать эффективные способы взаимодействия с этими системами. Для этого целесообразно использовать теорию иерархических систем и выбрать методы координации между подсистемами для достижения как локального минимума (применительно к отдельным системам), так и глобального – применительно ко всей системе ТПП.

Системный подход осложнен большими колебаниями уровня автоматизации решения технологических задач, так как еще многие задачи решаются вручную, и в то же время существуют задачи, решение которых полностью автоматизировано. Системный подход позволяет снизить затраты на создание и эксплуатацию САПР ТП за счет согласованного взаимодействия между компонентами систем и системной увязки между всеми видами их обеспечения.

*Методическое направление.* В САПР ТП должна быть реализована смешанная методика проектирования, позволяющая использовать как метод синтеза технологических процессов, так и проектирование на основе унифицированной технологии. Кроме того, САПР ТП должна допускать создание ТП на разных уровнях автоматизации проектирования.

*Функциональное направление.* В функциональном плане средой проектирования САПР ТП должна быть PDM-система, использование которой позволяет организовать эффективное управление и контроль процесса проектирования ТП.

*Информационное направление.* В информационном плане для доступа к электронному архиву САПР ТП должна использовать PDM-систему, ориентированную на архитектуру «клиент-сервер», при этом доступ к данным должен основываться на использовании «единого информационного пространства» и модели проблемной среды. Единое информационное пространство рассматривается как основа для интеграции САПР ТП с другими подсистемами АСТПП.

*Программно-математическое направление.* В программно-математическом плане современная САПР ТП должна иметь мощный пакет прикладных программ, позволяющих использовать третий уровень автоматизации проектирования ТП для широкого круга деталей и технологий.

Для принятия решений на основе алгоритмов, хранимых в базе знаний, необходимо иметь соответствующие инструментальные средства. Примером таких средств является табличный процессор.

Кроме того, САПР ТП должна иметь эффективные инструментальные средства для сопровождения и адаптации модели проблемной среды.

Для стыковки САПР ТП и САПР К необходимо иметь пакет программ для преобразования трех мерных моделей деталей и заготовок в параметрические модели и наоборот. На основе такого пакета возможна интеграция между конструкторским и технологическим САПР и САПР управляющих программ (CAD/CAPP/CAM-система).



*Организационное направление.* В организационном плане САПР ТП должна быть ориентирована на коллективную работу над технологическим процессом. Одновременный доступ к параметрической модели ТП предоставляется с помощью PDM-системы. Параллельно с проектированием ТП разрабатываются трехмерные модели операционных эскизов, и выполняется конструирование средств технологического оснащения. При необходимости, на базе виртуальных рабочих мест проводятся консультации по сложным вопросам со специалистами высокой квалификации. Для организации виртуальных рабочих мест PDM-система должна иметь выход в Internet.

Для контроля процесса проектирования технологии САПР ТП должна быть ориентирована на PDM-систему, имеющую средства для автоматизированного ведения документооборота.

Таким образом, создаваемые в ближайшие годы системы автоматизированного проектирования должны быть достаточно функционально развиты и обеспечивать снижение стоимости и трудоемкости разработки ТП; повышать качество проектируемых процессов, а также согласованно функционировать как подсистема с другими подсистемами АСТПП; иметь инструментальные средства для адаптации к изменяющимся условиям производства, а также иметь инструментальные средства для организации эффективного управления и контроля процесса проектирования ТП.

## 6.1 Обзор современных САПР-ТП

### *Системы Компас, Вертикаль и Лоцман: PLM*

Разработчиком систем является *российская фирма АСКОН* ([www.ascon.ru](http://www.ascon.ru)), имеющая представительство в столице республики Беларусь. На рынке фирма позиционируется, как разработчик систем комплексной автоматизации технической подготовки производства, включающей автоматизацию проектно-конструкторских работ (системы *КОМПАС-График*, *КОМПАС-3D*, «*Электронный Справочник конструктора*») и технологического

проектирования (система *ВЕРТИКАЛЬ*). Технический документооборот и управление информацией об изделиях автоматизируются использованием системы *ЛОЦМАН:PLM*.

Система трехмерного твердотельного моделирования *КОМПАС-*

*3D* предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа.

Чертежный графический редактор *КОМПАС-График* предназначен для автоматизации проектно-конструкторских работ в машиностроении и строительстве. Редактор может использоваться как интегрированный в *КОМПАС-3D* модуль, так и в качестве самостоятельного продукта, решающего задачи 2D-проектирования и выпуска документации.

Система автоматизации технологической подготовки производства *ВЕРТИКАЛЬ* – это программный комплекс автоматизации ТПП, предназначенный для решения следующих задач:

- проектирования ТП;
- расчета количества материалов для производства изделия;
- расчета режимов обработки;
- расчета затрат труда;
- формирования комплекта технологической документации.

*ЛОЦМАН: PLM* – это система управления инженерными данными и жизненным циклом изделия. Она является центральным компонентом единого информационного пространства и обеспечивает:

- управление информацией о структуре, вариантах конфигурации изделий и входимости компонентов в различные изделия;
- хранение технической документации на изделие;
- управление процессом разработки изделия.

### *Системы T-Flex: CAD, Технология и DOCs*

Эти системы разработаны российской компанией «Топ Системы» ([www.tflex.ru](http://www.tflex.ru)). Компания имеет филиал в Минске.

В комплекс *T-Flex* российской фирмы «Топ Системы» входит ряд подсистем конструкторского и технологического проектирования, прикладных программ, баз данных и подсистема документооборота. В подсистему конструкторского проектирования встроен модуль для подготовки УП для оборудования с ЧПУ. Таким образом, использование комплекса *T-Flex* позволяет получить полноценное *CAD/CAM*- решение.

Отличительной особенностью программных продуктов компании «Топ Системы» является использование ядра Parasolid, разработанного компанией «Unigraphics Solutions» в подсистеме трехмерного твердотельного моделирования *T-Flex CAD 3D*. Это позволяет получать параметрические чертежи любой сложности, включая сборочные. При этом в системе используется геометрическая параметризация, более устойчивая при модификации моделей, чем размерная, т.к. размерная ориентирована на построение эскизов для трехмерных операций и имеет определенные количественные ограничения. В *T-Flex CAD* параметрическим является все – от положения линий и элементов сборочного чертежа до содержимого текста и любых атрибутов элементов. Кроме того в *T-Flex CAD* есть модуль, позволяющий моделировать процессы нагружения конструкции и оценивать ее прочность с использованием метода конечных элементов.

Подсистема электронного документооборота *T-FLEX DOCs 2010* предоставляет современные и удобные средства организации работы с данными о составе изделия. Эти средства позволяют автоматически поддерживать в актуальном состоянии информацию о номенклатуре изделий, контролировать уникальность параметров и автоматизировать работу с объектами в составе изделия. Подсистема имеет в своем составе модуль контроля исполнительской дисциплины. Помимо этого *T-FLEX DOCs 2010*

имеет готовые модули интеграции практически ко всем наиболее популярным системам проектирования. Среди них: *T-FLEX CAD*, *Solid Works*, *Autodesk Inventor*, *AutoCAD*, *Компас*, *Pro/E* и *Siemens NX*.

Подсистема *T-Flex: Технология* поддерживает различные методы проектирования: диалоговое проектирование с использованием баз технологических данных; проектирование на основе техпроцесса-аналога; заимствование технологических решений из ранее разработанных технологий; проектирование с использованием библиотеки технологических решений; проектирование групповых и типовых технологических процессов; из общего технологического процесса; автоматическое проектирование с использованием библиотеки технологических решений. При проектировании нового инструмента, оснастки или комплектующих в *T-FLEX CAD*, а также при создании операционных эскизов, их рабочие чертежи могут быть ассоциативно связаны с элементами справочников программы для технологической подготовки *T-FLEX Технология*.

При работе с подсистемой *T-FLEX Технология* пользователь может оперировать всеми необходимыми технологическими данными в рамках одного системного окна. Многостраничный интерфейс позволяет для просмотра конструкторского чертежа детали и созданных операционных эскизов не переключаться между приложениями. Рабочее окно обеспечивает отображение операционного маршрута обработки, расцеховочного маршрута, справочников и расчетов в виде дерева.

В подсистему подготовки программ для станков с ЧПУ входит более 100 готовых постпроцессоров для фрезерной, токарной, сверлильной, электроэрозионной и лазерной обработки, имеются средства для генерации постпроцессоров, отсутствующих в библиотеке. Возможно формирование программ 2,5-, 3- и 5-координатной фрезерной обработки.

## 6.2 Основные преимущества применения станков с ПУ

Использование того или иного вида оборудования зависит от сложности изготавливаемой детали и серийности производства. Чем меньше серийность производства, тем большую технологическую гибкость должен иметь станок. В единичном производстве при изготовлении деталей очень малыми партиями (1-3 шт.) можно применять для автоматизации станки с преднабором координат и цифровой индикацией. При изготовлении сложных деталей в единичном производстве, а также для автоматизации мелкосерийного производства наиболее эффективно применять станки с ЧПУ. В серийном производстве целесообразно использовать станки как с ЦПУ, так и с ЧПУ. В последнее время в условиях переналаживаемого крупносерийного производства широко используют станки с ПУ для изготовления корпусных деталей и деталей типа тел вращения.

В некоторых случаях при изготовлении деталей со сложными профилями использование станков с ЧПУ является почти единственным технически оправданным решением. Это оборудование целесообразно применять и тогда, когда невозможно быстро изготовить оснастку.

Основные преимущества станков с ЧПУ:

- 1) производительность станка повышается в 1,5-5 раз по сравнению с аналогичными станками с ручным управлением;
- 2) сочетается гибкость универсального оборудования с точностью и производительностью станка-автомата, что и позволяет решать вопрос комплексной автоматизации единичного и серийного производства;
- 3) качественно перевооружается машиностроение на базе современной электроники и вычислительной техники;
- 4) снижается потребность в квалифицированных рабочих-станочниках, а подготовка производства переносится в сферу инженерного труда;
- 5) сокращается время пригоночных работ в процессе сборки, так как детали, изготовленные по одной программе, являются взаимозаменяемыми;

6) сокращаются сроки подготовки и перехода на изготовление новых деталей благодаря централизованной записи программ и более простой и универсальной технологической оснастке;

7) снижается продолжительность цикла изготовления деталей и уменьшается запас незавершенного производства.

Номенклатура оборудования с ПУ расширяется для всех видов технологических процессов, используемых в машиностроении: раскройно-заготовительных, кузнечно-прессовых, штамповочных, гибочных, токарных, сверлильно-фрезерно-расточных, шлифовальных, электроэрозионных и др. Все выпускаемое оборудование с ПУ, как правило, ориентировано на минимальное участие человека в процессе производства и на обеспечение максимального использования его в гибких производственных системах различного назначения.

### 6.3 САПР-ТП как инструмент управления гибких технологических систем

Гибкие автоматизированные производства (ГАП) — автоматизированные технологические системы, включающие станки с ЧПУ, обрабатывающие центры, автоматические склады, объединенные с мини-ЭВМ, снабженные определенным набором управляющих программ и обеспечивающие автоматизацию многономенклатурного машиностроительного производства.

Гибкие автоматизированные производства позволяют быстро переходить от обработки одного изделия к другому, одновременно выполнять различные операции. Гибкие автоматизированные производства применяются в различных формах, определяемых требованиями производства, для обработки самых разнообразных деталей станков, двигателей, транспортных машин, турбин.

С помощью ГАП выполняется широкий круг операций, включающих контурное фрезерование, фрезерование плоскостей, сверление,

резьбонарезание, токарно-патронную обработку, обработку на карусельном станке, зубофрезерование, шлифование и многое другое.

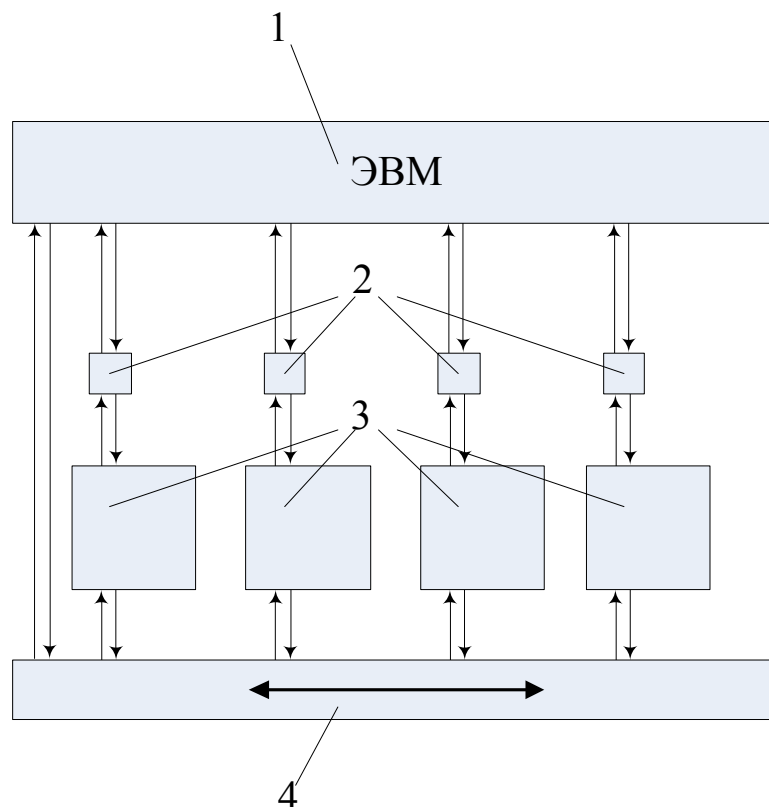
Гибкие автоматизированные производства должны отвечать самым высоким требованиям по точности, быстродействию, надежности. В конструкциях элементов ГАП применяются пневматические, электрогидравлические и электрические приводы, различающиеся принципами действия и функциональными возможностями. Средства вычислительной техники являются основными компонентами ГАП; появление микропроцессорной техники обусловило широкое развитие ГАП.

С точки зрения функций управления гибкие автоматические производства представляют собой автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые осуществляются с помощью САПР-ТП или САМ.

Возможность создания таких систем связана с появлением современных ЭВМ, которые позволяют осуществлять управление работой сложных объектов. В наиболее совершенных ГАП происходит не только непосредственное прямое управление работой всех машин системы сигналами от ЭВМ, но и использование обратных связей. Все виды оборудования с помощью датчиков обратных связей подают на ЭВМ сигналы о фактическом протекании технологического процесса и о работе системы в целом. Основываясь на этих сигналах обратных связей, ЭВМ непрерывно воздействует на работу оборудования с целью поддержания оптимального режима работы системы как в техническом, так и в организационном плане.

Применение ЭВМ и других технических достижений последних лет позволяет создавать принципиально новые производства высокой гибкости, быстрой приспособляемости к меняющимся условиям производства. Эта гибкость определяется следующими характерными особенностями указанных производств: способностью к быстрой переналадке; возможностью перемещения заготовок со станка на станок в любом направлении; непрерывным оперативным воздействием на работу всей системы с целью

поддержания технологического процесса на наиболее высоком уровне, как по производительности, так и по качеству продукции; возможностью проектирования технологических процессов и программирования обработки с помощью ЭВМ, например, с помощью САПР-ТП или САМ.



*Рисунок 6.1 - Схема построения ГАП:*

1 – управляющая ЭВМ, 2 – пульта ЧПУ, 3 – станки с ЧПУ,  
4 – транспортно-складирующая система

Основные функции ЭВМ в развитых гибких производствах состоят в следующем:

- оперативное планирование загрузки оборудования с целью обеспечения максимальной производительности и эффективности работы системы;
- проектирование технологических процессов и программирование обработки на станках с ЧПУ;



- управление работой станков, транспортно-складирующих устройств, роботов, устройств обеспечения станков инструментами;
- выявление неисправностей оборудования, сигнализация о его состоянии и управление работой ремонтной службы.

Оперативное планирование загрузки оборудования, реализуемое с помощью ЭВМ, позволяет выбирать оптимальные варианты маршрутов обработки, последовательности запуска партий заготовок различных наименований в производство, распределения их между одинаковыми станками.

Проектирование технологических процессов и программирование обработки с помощью ЭВМ делают возможным в очень короткие сроки подготовить выпуск деталей других наименований или выпуск тех же деталей, но из заготовок другого вида, а также скорректировать технологический процесс, если заготовки имеют заниженные или завышенные припуски на обработку.

Непосредственное управление посредством ЭВМ работой всего оборудования ГАП приводит к значительному повышению надежности работы всей системы.

В силу того, что станки с ЧПУ заметно отличаются от станков с ручным управлением, принципы их использования должны быть особыми. Практика создания ГАП подтверждает это положение.

Так, подбор станков для гибких производств в настоящее время производится на основе одного из двух принципов:

1. принципа взаимодополняющих станков;
2. принципа взаимозаменяющих станков.

Принцип взаимодополняющих станков в целом соответствует их традиционному набору и расположению на участке в технологической последовательности. Например, если на участке обрабатываются тела вращения, то первыми будут расположены фрезерно-центровальные (подрезка торцов и зацентровка заготовок валов), затем токарные станки. За ними обычно

идут зуборезные, а затем фрезерные, сверлильные и т. д. Здесь каждый новый вид станков дополняет (расширяет) возможности участка. Действительно, при наличии в системе только токарных станков можно изготавливать лишь самые простые детали. Зуборезные станки позволяют, кроме того, изготавливать зубчатые колеса. Такой подбор станков в ГАП и называется принципом взаимодополняющих станков. Недостатком производства, построенного на этом принципе, является низкая технологическая надежность, потому что выход из строя какого-либо станка, имеющегося в единственном экземпляре, сразу же уменьшает номенклатуру выпускаемых деталей.

Принцип взаимозаменяющих станков состоит в том, что на участке используются станки только одной модели. Если, например, участок оборудован одними токарными станками, то технологическая надежность системы будет высокая. Действительно, выход из строя одного-двух станков здесь приводит лишь к уменьшению производительности, но не к сужению номенклатуры выпускаемых деталей.

Другое дело, если использованы многооперационные станки. В этом случае резко повышаются возможности гибкого производства при его высокой технологической надежности.

Таким образом, применение принципа взаимозаменяющих станков наиболее эффективно, если гибкое производство построено на основе многооперационных станков. Такие производства отличаются исключительно высокой гибкостью. Можно, например, все станки загрузить одной и той же работой (выполнение одинаковых операций), а можно на разных станках выполнять последовательный ряд операций по изготовлению одновременно одной, двух или более деталей разных наименований.

Использование многооперационных взаимозаменяющих станков значительно повышает стоимость построения производственной линии. В связи с этим считается экономически выгодным построения линии взаимодополняющих станков из многооперационных станков с ограниченной функциональностью. Целью подобного построения является возможность

перенести нагрузки вышедшего из строя узла на станки с подобным функционалом, чаще всего соседние.

Современные достижения в автоматике, радиоэлектронике и вычислительной технике позволяют рассматривать комплексную автоматизацию производственных процессов как единую систему автоматизации, охватывающую производство, в целом начиная с проектирования изделий и технологии их изготовления и кончая доставкой изделий потребителю. С расширением применения робототехнических средств, наряду с внедрением оборудования, отличающегося высокой степенью концентрации операций, значительно повысилась гибкость управления производством. Сегодня машиностроение стоит на пороге широкого внедрения комплексно-автоматизированных ГПС, позволяющих предприятиям в нужный момент и за короткое время переходить на выпуск новой или существенно модернизированной продукции при минимальных затратах.

ГПС — это новый этап в автоматизации производства, основанной на широком использовании принципов групповой технологии, станков с числовым программным управлением (в том числе типа «обрабатывающий центр») и гибких автоматизированных производственных модулей, промышленных роботов, роботизированных комплексов, автоматизированного транспортно-складского оборудования и других машин, объединенных автоматизированной системой управления производством. Непременными компонентами ГПС являются системы автоматизированного проектирования и автоматизированные системы управления технологическими процессами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн./Под ред. Норенков И.П.: — М.: Высш. шк., 1986.
2. А.Н. Иванов Автоматизированное проектирование и расчет узлов опто-электронных приборов в САПР КОМПАС. Учебное пособие [Электронный ресурс] - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. - 56 с. - 50 экз. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/991.pdf> (дата обращения: 5. 09.2012).
3. Аверин, Владимир Николаевич. Компьютерная инженерная графика: рекомендовано Федеральным государственным учреждением "Федеральный институт развития образования в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования / В.Н. Аверин. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2011. - 224 с. - (Среднее профессиональное образование). - ISBN 978-5-7695-8318-6 (в пер.) : 355.41 р.
4. Автоматизация конструкторских работ в среде Компас-3D В. В. Самсонов, Г. А. Красильникова. - 2-е изд., стер. - М. : Академия, 2009. - 224 с. - (Высшее профессиональное образование). - ISBN 978-5-7695-6206-8 : 220 р.
5. Автоматизация производственных процессов: учебное пособие / Л.И. Волчкевич. -М.: "Машиностроение", 2007 г. - 380 с.
6. Бельков В.Н., Ланшаков В.Л. Автоматизированное проектирование технических систем/ Учебное пособие [Электронный ресурс]- Издательство "Академия Естествознания", 2009 год - 143 с: URL: <http://ww.twirpx.com/file/678774/> (дата обращения 10.09.2012).
7. Бунаков П.Ю., Рудин Ю.И., Стариков А.В. Основы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов/ Учебник по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов» для студентов специальности. Под ред. С.Н. Рыкунина, [Электронный ресурс] - М.: МГУЛ, 2008. - 194 с: ил.; URL: <http://www.twirpx.com/file/255605/> (дата обращения 10.09.2012).

8. Г.Г. Хайдаров, В.Т. Тозик Компьютерные технологии трехмерного моделирования [Электронный ресурс] - Санкт-Петербург: , 2010. - 80 с. - 100 экз. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/673.pdf> (дата обращения: 5. 09.2012).
9. Головицына М. Основы САПР [Электронный ресурс] - М: Национальный открытый университет «ИНТУИТ» - URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/2264/227/info> (дата обращения: 5. 09.2012).
10. К.А. Хайдаров Курс лекций "Компьютерная графика"[Электронный ресурс] - Боровское исследовательское учреждение, Bourabai Research Institution - URL: <http://bourabai.kz/graphics/index.htm> (дата обращения: 5. 09.2012).
11. К.А. Хайдаров Основы компьютерного моделирования [Электронный ресурс] - Боровское исследовательское учреждение, Bourabai Research Institution - URL: <http://bourabai.kz/cm/index.htm>(дата обращения: 5. 09.2012).
12. Келлер, Зигфрид. SYMplus 5.1. Рабочая тетрадь. Токарная обработка/ Издание 2е -М.: ЗАО «Дидактические системы», 2009.- 120 с.-ил.
13. Кондаков А.И. САПР технологических процессов [Электронный ресурс]- М.: Издательский центр Академия", 2008. - 272с. URL: <http://www.twirpx.com/file/37727/> (дата обращения 10.09.2012).
14. Кузьмин, Владимир Владимирович. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: допущено Мин. образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и направлению подготовки дипломированных специалистов "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В.В. Кузьмин; Под ред. Ю.М. Соломенцева. - М. : Высшая школа, 2008. - 279 с.: ил. - ISBN 978-5-06-004837-7 : 371.50 р.

15. Машиностроение: энциклопедия. Т. III-5. Технология сборки в машиностроении /под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Машиностроение, 2006. - 640 с.: ил. - ISBN 5-217-01959-X (в пер.) : 875 p.
16. Машиностроение: энциклопедия. Т. III-3. Технология изготовления деталей машин / под общ. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2006. - 840 с.: ил. - ISBN 5-217-01958-X (в пер.) : 796 p., 255 p.
17. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, каф. САПР, 2000.
18. Норенков И.П. Основы САПР / Автоматизированная обучающая система БиГОР [Электронный ресурс] – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, каф. САПР - URL: [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140\\_CADedu/CAD.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140_CADedu/CAD.cou) (дата обращения: 5. 09.2012).
19. Норенков И.П. Применение CAD/CAM систем для проектирования и технологической подготовки производства / Автоматизированная обучающая система БиГОР [Электронный ресурс] – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, каф. САПР - URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=NJD67VC40B9S70SSMJ90>(дата обращения: 5. 09.2012).
20. Петухов А.В. и др. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Учебное пособие [Электронный ресурс] - М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос.техн. ун-т им П.О Сухого, 2011. - 144 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/683038/> (дата обращения 10.09.2012).
21. Программное обеспечение САПР/Беломойцев Д. Е., Волосатова Т.М., Родионов С.В. / Автоматизированная обучающая система БиГОР [Электронный ресурс] – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, каф. САПР - URL:[http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=PO\\_CAD/base.cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=PO_CAD/base.cou)(дата обращения: 5. 09.2012).
22. Соснин, Олег Михайлович. Основы автоматизации технологических процессов и производств: допущено У МО по образованию в области автоматизированного машиностроения в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности

- "Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение)" направления подготовки "Автоматизированные технологии и производства" / О. М. Соснин. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2009. - 240 с. - (Высшее профессиональное образование). - ISBN 978-5-7695-6487-1 (в пер.): 291.06 р., 280 р.
23. Технологические основы гибких производственных систем: учебник / Под ред. Ю.М. Соломенцева. - 2-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 255 с. : ил. - ISBN 5-06-003664-2 (в пер.) : 53.90 р.
24. Черепашков, А. А., Носов, Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении [Электронный ресурс] - М.: ИнФолио, 2009. - 642 с: ил. URL: <http://www.twirpx.com/file/461139/> (дата обращения 10.09.2012).
25. Электронные устройства информационных систем и автоматики. Учебник / Э.М. Ромаш, Н.А. Феоктистов, В.В. Ефимов. - М.: Дашков и К<sup>0</sup>, 2009 г. - 248 стр.

*Абрамов Александр Евгеньевич*

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ**

**Конспект лекций**

Подписано в печать  
Формат 60x84 1/16.  
Усл. п. л. 1,9 , тираж ....50 экз.  
Заказ №.....

---

Адрес издателя:  
432017 , г. Ульяновск,  
бульвар Новый Венец, 1