

# Содержание

<b>Введение</b> .....	10
Организатор курса .....	10
Целевая группа .....	10
Цели курса .....	11
Организация занятий .....	11
Структура курса .....	11
Благодарности .....	12
<b>Лекций 1. Введение в САПР</b> .....	13
Классы САПР .....	14
Автоматизация современного машиностроительного предприятия .....	14
Исторический обзор развития систем автоматизации проектирования .....	16
Функциональность CAD-систем .....	22
Современные CAD-системы и их классификация .....	25
Системы инженерного анализа (CAE) .....	26
Системы технологической подготовки производства (CAPP) .....	27
Системы автоматизации производства (CAM) .....	28
Системы управления данными об изделии (PDM) .....	28
Интегрированные пакеты управления жизненным циклом изделия .....	30
Вопросы для самоконтроля .....	31
Дополнительная литература .....	31
<b>Лекция 2. Геометрическое моделирование</b> .....	33
Автоматизация черчения и геометрическое моделирование ...	34
Виды геометрического моделирования .....	35
Функции твердотельного моделирования .....	37
Декомпозиционные модели .....	38
Конструктивные модели .....	39
Граничные модели .....	40
Корректность граничных моделей .....	42

Пакеты геометрического моделирования и их функциональность .....	43
Вопросы для самоконтроля .....	44
Дополнительная литература .....	44

### **Лекция 3. Базовые геометрические объекты** ..... 45

Аффинное пространство и соглашение о нотации .....	46
Способы задания аналитических кривых и поверхностей .....	46
Изометрии аффинного пространства .....	48
Матричное представление трансформации в аффинном пространстве .....	49
Однородные координаты .....	50
Углы Эйлера .....	51
Экспоненциальное представление трансформации .....	52
Вопросы для самоконтроля .....	53
Дополнительная литература .....	54

### **Лекция 4. Инженерные кривые и поверхности** ... 55

Кусочные кривые и их гладкость .....	56
Билинейный лоскут .....	56
Поверхности сдвига и вращения .....	56
Линейчатая поверхность .....	57
Лоскут Кунса .....	57
Эрмитова кривая, бикубическая поверхность и лоскут Фергюсона .....	58
Кривые и поверхности Безье .....	61
Алгоритм де Кастельжо .....	62
В-сплайны и В-сплайновые поверхности .....	63
Рациональные кривые и поверхности .....	64
Интерполяционные кривые и поверхности .....	65
Вопросы для самоконтроля .....	65
Дополнительная литература .....	66

### **Лекция 5. Обмен геометрическими данными** ..... 67

Стандарты обмена геометрическими данными .....	68
Формат IGES .....	68
Формат DXF .....	70

Формат STEP .....	70
Мозаичные модели .....	71
Формат STL .....	72
Формат VRML .....	73
Поверхности подразделения .....	73
Вопросы для самоконтроля .....	79
Дополнительная литература .....	79

## **Лекция 6. Вариационное моделирование: алгебраический подход**..... 81

Параметры, ограничения и вариационные модели .....	82
Создание эскизов и проектирование сборок .....	82
Задача размещения геометрических объектов и ее характеристики .....	83
Вариационный геометрический решатель .....	84
Способы алгебраического моделирования геометрической задачи .....	85
Метрический тензор геометрической задачи .....	86
Методы символьного упрощения систем алгебраических уравнений .....	87
Декомпозиция Далмеджа–Мендельсона .....	88
Метод Ньютона–Рафсона .....	89
Решение систем линейных уравнений .....	91
Методы координатного и градиентного спуска .....	92
Вопросы для самоконтроля .....	93
Дополнительная литература .....	93

## **Лекция 7. Вариационное моделирование: диагностика и декомпозиция задачи**..... 95

Диагностика геометрических задач .....	96
Методы упрощения геометрических задач .....	96
Определение и классификация методов декомпозиции .....	97
Граф ограничений .....	97
Методы рекурсивного деления .....	98
Методы рекурсивной сборки .....	99
Формирование кластеров с помощью анализа графа ограничений .....	100

Формирование кластеров на основе шаблонов .....	102
Эвристическое формирование псевдокластеров .....	103
Распространение степеней свободы .....	103
Вопросы для самоконтроля .....	103
Дополнительная литература .....	104

## **Лекция 8. Инженерия знаний в САПР .....** 105

Параметрическое проектирование на основе конструктивных элементов .....	106
Инженерные параметры .....	108
Отношения базы знаний .....	109
Параметрическая оптимизация .....	110
Экспертные знания и производственные системы .....	112
Вопросы для самоконтроля .....	113
Дополнительная литература .....	114

## **Лекция 9. Методы поиска и оптимизации решения .....** 115

Задачи удовлетворения ограничениям и оптимизации в ограничениях в общей постановке, их связь .....	116
Классификация методов поиска и оптимизации решения ....	117
Метод координатного спуска .....	118
Метод градиентного спуска .....	118
Жадный алгоритм .....	119
Метод Ньютона .....	119
Методы перебора .....	120
Методы редукции областей .....	121
Метод ветвей и границ .....	123
Алгоритм модельной закалки .....	124
Генетические алгоритмы .....	125
Вопросы для самоконтроля .....	126
Дополнительная литература .....	126

## **Лекция 10. Инженерный анализ кинематики ....** 127

Прямая и обратная задачи кинематики механизмов .....	128
Виды кинематических пар .....	128

Моделирование механизмов .....	131
Геометрические измерения .....	131
Моделирование задачи кинематики .....	132
Дифференциальное уравнение движения .....	133
Натуральный градиент уравнения .....	134
Алгоритмы численного решения дифференциальных уравнений .....	135
Планирование движения .....	136
Вопросы для самоконтроля .....	137
Дополнительная литература .....	138

## **Лекция 11. Инженерный анализ динамики .....** 139

Задача анализа динамики механизмов .....	140
Движение абсолютно твердого тела в трехмерном пространстве .....	140
Моделирование контакта тел .....	142
Альтернативный подход: уравнения Лагранжа .....	143
Методы определения столкновений .....	145
Алгоритмы широкой фазы .....	145
Алгоритмы фазы сужения .....	147
Коммерческое программное обеспечение для симуляции движения .....	148
Вопросы для самоконтроля .....	148
Дополнительная литература .....	149

## **Лекция 12. Инженерный анализ методом конечных элементов .....** 151

Конечно-элементный анализ .....	152
Введение в метод конечных элементов .....	152
Анализ упругости тела .....	152
Тензор деформаций .....	153
Тензор напряжений .....	154
Обобщенный закон Гука, матрицы жесткости и упругости ....	155
Уравнение равновесия тела под нагрузкой .....	157
Применение МКЭ для расчета малых напряжений тела под нагрузкой .....	157
Другие приложения МКЭ .....	159
Типы конечных элементов .....	159

Разбиения для МКЭ .....	160
Общая схема конечно-элементного анализа в САЕ-системах .....	161
Коммерческие пакеты конечно-элементного анализа .....	162
Вопросы для самоконтроля .....	162
Дополнительная литература .....	164

### **Лекция 13. Автоматизация производства .....**

Архитектура станков с ЧПУ .....	166
Принципы программирования для станков с ЧПУ .....	167
Языки программирования высокого уровня для станков с ЧПУ ..	168
Генерация программ для станков с ЧПУ по САД-моделям ....	170
Быстрое прототипирование и изготовление .....	171
Виртуальная инженерия .....	173
Вопросы для самоконтроля .....	173
Дополнительная литература .....	174

### **Лекция 14. Технологическая подготовка производства .....**

Интеграция САД и САМ .....	176
Задачи инженера-технолога .....	176
Модифицированный подход к технологической подготовке ....	177
Групповая технология .....	178
Классификация и кодирование деталей .....	178
Генеративный подход к технологической подготовке .....	180
Конструкторско-технологические элементы .....	181
Методы автоматического распознавания конструктивных элементов .....	182
Пример автоматического распознавания КТЭ .....	185
Вопросы для самоконтроля .....	185
Дополнительная литература .....	186

### **Лекция 15. Управление данными на протяжении жизненного цикла изделия .....**

Системы управления данными об изделии .....	188
Цифровой макет изделия (DMU) и спецификация материалов (BOM) .....	188

---

Примеры PDM-систем .....	189
Программное обеспечение для организации бизнес-процессов .....	189
Из чего состоит PLM? .....	191
Интеграция PLM с системами управления отношениями с заказчиками .....	193
Интеграция PLM с системами управления цепочками поставок .....	194
Интеграция PLM с системами управления ресурсами предприятия .....	195
Практические подходы к интеграции систем PLM с CRM, SCM и ERP .....	197
Преимущества внедрения систем PLM .....	199
Вопросы для самоконтроля .....	200
Дополнительная литература .....	201

<b>Краткий англо-русский словарь аббревиатур в области автоматизации проектирования и производства .....</b>	<b>202</b>
--	------------

<b>Список литературы .....</b>	<b>205</b>
--------------------------------	------------

# Введение

Настоящая книга представляет собой второе издание оригинального одноименного курса лекций, который раз разработан автором для обучения студентов профильных специальностей математическим и информационным основам разработки систем автоматизации проектных работ и смежного программного обеспечения. Данный курс читается автором с 2005 года в Новосибирском государственном университете для студентов-магистрантов двух факультетов: механико-математического и информационных технологий.

## Организатор курса

Курс лекций был подготовлен автором при поддержке компании ЛЕДАС, являющейся независимым производителем вычислительных программных компонентов для систем автоматизации проектирования и планирования. Компанией разработаны оригинальные технологии, основанные на программировании в ограничениях (научная область на стыке вычислительной математики и комбинаторики), которые широко применяются при производстве собственных и заказных программных продуктов, а также при оказании консультационных услуг. Среди клиентов ЛЕДАС – ведущие мировые и российские производители систем автоматизированного проектирования (CAD), систем подготовки производства (CAM), инженерного анализа (CAE), управления жизненным циклом изделия (PLM), а также проектного и ресурсного планирования.

## Целевая группа

Курс ориентирован на студентов старших курсов университетов, специализирующихся в области прикладной математики, информатики и информационных технологий. От слушателей требуются базовые знания линейной алгебры, аналитической геометрии, теории графов, программирования. Для глубокого понимания излагаемого материала полезно знакомство с вычислительными методами решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, а также с алгоритмами из области исследования операций.

## Цели курса

При составлении программы курса были приняты во внимание следующие цели:

- познакомить студентов с математическими основами современных САПР (систем автоматизации проектных работ, подготовки производства, инженерного анализа, управления жизненным циклом изделия);
- научить алгоритмам и методам, применяемым при решении типичных задач автоматизации проектирования;
- ввести в проблематику создания современных вычислительных компонентов для САПР;
- подготовить студентов к участию в промышленной разработке вычислительных модулей для САПР.

## Организация занятий

Курс организован в виде еженедельных лекций (по два академических часа каждая), читаемых на протяжении одного семестра (всего 15 лекций). Возможна организация практикума на персональном компьютере с использованием образовательных лицензий на один из современных САПР-пакетов. Студенты, успешно прослушавшие настоящий курс и подтвердившие свои знания на экзамене, могут рассчитывать на прохождение преддипломной практики и последующее трудоустройство в софтверных компаниях, занимающихся производством наукоемкого программного обеспечения для автоматизации проектирования и планирования производства.

## Структура курса

Курс состоит из пятнадцати лекций. Первая лекция посвящена обзору современного состояния программных систем, традиционно относимых к классу САПР. Следующие четыре лекции описывают геометрические основы систем автоматизированного проектирования. Материал шестой и седьмой лекций содержит описание различных алгоритмов, используемых при решении задач вариационного проектирования. Инженерные инструменты САПР и алгоритмы решения соответствующих задач рассматриваются в восьмой и девятой лекции.

ях. Десятая, одиннадцатая и двенадцатая лекции представляют математический аппарат систем инженерного анализа. Тринадцатая описывает математический аппарат, используемый для работы со станками ЧПУ, а четырнадцатая посвящена математическим основам систем технологической подготовки производства. Последняя, пятнадцатая лекция посвящена системам интеграции данных об изделии, используемых на протяжении его жизненного цикла. В конце каждой лекции приводится список вопросов для самоконтроля, а также рекомендации по дополнительному чтению.

## **Благодарности**

Идея издания настоящей книги принадлежит генеральному директору ЗАО ЛЕДАС Давиду Яковлевичу Левину, который также взял на себя руководство процессом ее издания и поддерживал автора на всех этапах подготовки текста. Корректурa текста, осуществленная Людмилой Александровной Каревой, позволила избежать многих ошибок. Автор выражает благодарность своим коллегам, которые прочитали предварительные версии настоящего курса лекций и любезно указали на пробелы и недостатки в его структуре и содержании. Автор также признателен всем читателям настоящего текста за возможные замечания, исправления, пожелания по излагаемому материалу, которые он с благодарностью примет по e-mail [ushakov@ledas.com](mailto:ushakov@ledas.com).

## Введение в САПР

Классы САПР .....	14
Автоматизация современного машиностроительного предприятия .....	14
Исторический обзор развития систем автоматизации проектирования .....	16
Функциональность CAD-систем .....	22
Современные CAD-системы и их классификация .....	25
Системы инженерного анализа (CAE) .....	26
Системы технологической подготовки производства (CAPP) .....	27
Системы автоматизации производства (CAM) .....	28
Системы управления данными об изделии (PDM) .....	28
Интегрированные пакеты управления жизненным циклом изделия .....	30
Вопросы для самоконтроля .....	31
Дополнительная литература .....	31

## Классы САПР

За русским термином САПР (Система Автоматизации Проектных Работ) скрывается несколько классов программных систем, имеющих отношение к автоматизации труда инженеров, конструкторов и технологов. Каждый из классов имеет устоявшуюся трехбуквенную английскую аббревиатуру:

- двумерное черчение и трехмерное геометрическое проектирование (CAD);
- инженерный анализ (CAE);
- технологическая подготовка производства (CAPP);
- автоматизация производства (CAM);
- управление данными об изделии (PDM);
- управление жизненным циклом изделия (PLM).

Кроме того, к САПР относятся программы для автоматизации труда архитекторов и строителей, топографов и геологов, которые, однако, остаются за рамками данного курса. В фокусе нашего внимания будут «механические» САПР (MCAD), используемые машиностроительными предприятиями и конструкторскими бюро. Механические САПР являются одними из исторически первых программ для ЭВМ, занимая в настоящее время около 3% мирового рынка программного обеспечения. Без систем САПР невозможно представить себе ни одно современное производственное предприятие аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, электронной и других отраслей промышленности, включая производство потребительских товаров.

## Автоматизация современного машиностроительного предприятия

Для четкого понимания излагаемых в рамках данного курса концепций автоматизации различных процессов, связанных с жизненным циклом изделия, рассмотрим сначала типичную схему организации производства современного машиностроительного предприятия. Как правило, любое предприятие специализируется на производстве конкретных типов изделий. У предприятия обязательно имеется отдел маркетинга, который проводит рыночные исследования, ведет работу с потенциальными и реальными клиентами и добивается заключения контрактов на производство и поставку партии изделий. Получив конкретный заказ, отдел маркетинга передает его главному

инженеру предприятия, который должен оценить, можно ли в принципе выполнить этот заказ на технологической базе предприятия. Для этого он поручает конструкторскому отделу подготовить проект изделия. В большинстве случаев инженер-конструктор имеет дело с проектированием изделия, которое конструктивно похоже на выполненные ранее работы (так как обычное предприятие специализируется на каком-то одном типе изделий). Поэтому он сначала находит похожий проект среди работ, выполненных в конструкторском отделе ранее, копирует его и вносит требуемые изменения, а затем передает обратно главному инженеру. Далее проект попадает в технологический отдел, где осуществляется составление проектного плана – последовательности операций, которые необходимо выполнить в цехах предприятия для производства изделия (обработки деталей и их сборки). Третий этап – проверка наличия на складе всех необходимых комплектующих (заготовок или готовых деталей от предприятий-смежников) и заказ недостающих частей при необходимости. Четвертый – собственно производство партии изделий, как правило, связанное с изготовлением отдельных деталей на станках и прессах (при использовании станков с числовым программным управлением требуется их соответствующим образом перепрограммировать), а также сборка конечного изделия (при использовании конвейерных линий с роботами-сборщиками требуется переналадить их на сборку модифицированного изделия). Пятый этап – контроль качества, шестой – упаковка изделий; а завершается все поставкой изделий заказчику, организацией их послепродажного обслуживания и – при необходимости – утилизацией.

Таким образом, любое современное производство, даже весьма скромных объемов, требует наличия квалифицированного персонала, выполняющего большое количество самых разных интеллектуальных операций, сопровождающихся значительным документооборотом. Излишне говорить, что трудоемкость создания каждого документа (как правило, это чертежи изделий и техническая документация к ним) традиционными методами (с использованием чертежной доски – кульмана) невероятно велика. В условиях усиливающейся конкуренции (связанной с постоянным ростом экономики, с открытием рынков, с глобализацией в масштабах всей планеты) выживают только те предприятия, которые способны быстро и адекватно отвечать на постоянное изменение рыночных условий, то есть минимизировать время выполнения любого заказа. Для помощи таким предприятиям и были разработаны интегрированные программные системы

автоматизации, ускоряющие каждую область деятельности по отдельности и в то же время связывающие их между собой в рамках одной информационной системы предприятия.

## Исторический обзор развития систем автоматизации проектирования

Развитие систем автоматизации проектирования происходило в тесном сотрудничестве научных лабораторий, военных ведомств и промышленных предприятий. История этого развития включала в себя несколько ключевых событий, которые можно объединить по десятилетиям:

*1950-е годы. Создание станков с числовым программным управлением (ЧПУ)*

**1952.** В Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT) создан первый фрезерный станок с ЧПУ.

**1957.** Система PRONTO – первое коммерческое ПО для управления станками с ЧПУ.

*1960-е годы. Системы компьютерной графики и системы автоматизации черчения*

**1963.** Айван Сазерлэнд (Ivan Sutherland) из MIT создал программу SKETCHPAD, которая намного опередила свое время и теперь считается первой системой автоматизации черчения (рис. 1).



Рис. 1

**1964.** Американские математики Фергюсон (J.C. Ferguson) из Boeing и Кунс (Steven A. Coons) из MIT предлагают различные способы задания параметрических поверхностей, обладающих определенными геометрическими свойствами. Сотрудник General Motors де Бур (C. de Boor) впервые использует для инженерных целей понятие B-сплайна, предложенное еще в 1948 г. Пару лет спустя французские математики Безье (Pierre Bézier) и де Кастельжо (Paul de Casteljau), работающие на конкурирующие компании Renault и Citroën, независимо изобрели аппарат для построения инженерных кривых и поверхностей по контрольным точкам, который лег в основу современного поверхностного моделирования.

**1965.** В Computer Laboratory Кембриджского университета создается CAD Group. Эта команда ученых, возглавляемая Чарльзом Лангом (Charles Lang), проводит исследования в области создания программных средств, лежащих в основе MCAD/CAM. Вскоре к CAD Group присоединяется Ян Брэйд (Ian Braid), который разрабатывает экспериментальную систему BUILD, систему геометрического моделирования на основе революционной для того времени технологии – граничного представления (BRep).

**1965.** Ведущие машиностроительные корпорации (Lockheed и McDonnell) создают первые коммерческие CAD/CAM-системы, а также системы анализа методом конечных элементов.

**1967, 1969.** Создание первых софтверных компаний, производящих САПР: американских SDRC и Computervision. Их продукты – I-DEAS и CADSS (а позднее и Windchill) на долгие годы становятся стандартом САПР. Позднее обе компании были поглощены новыми лидерами рынка – с 1998 г. Computervision принадлежит Parametric Technology Corporation, а в 2002 г. SDRC была куплена EDS и объединена с Unigraphics.

### *1970-е. Первые 3D-системы*

**1974.** Ведущие участники CAD Group в Кембридже образуют компанию Shape Data Ltd., которая начинает разработку коммерческого геометрического ядра ROMULUS (на языке Fortran), основанного на идеях, обкатанных в экспериментальном ядре BUILD. Вскоре продается первая коммерческая лицензия на ROMULUS. Покупатель – компания HP – использует ее для создания своей CAD-системы ME30 (наследником которой является CoCreate OneSpace Modeler).

**1974.** Выступление американского художника-дизайнера Чайкина (G. Chaikin) на конференции CAGD в университете Юты с пред-

ставленным им алгоритмом быстрой генерации кривой заданной формы породило новую область исследований – теорию поверхностей подразделения; в настоящее время все известные способы компактного представления трехмерных моделей основаны на этой теории.

**1977.** Французская авиастроительная компания Avions Marcel Dassault (ныне Dassault Aviation) создает систему трехмерного проектирования CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application; позднее для разработки следующих версий системы будет создана специальная софтверная компания – Dassault Systèmes), остающаяся до сих пор непревзойденной по своим уникальным возможностям поверхностного моделирования, широко используемым ведущими предприятиями авиакосмической и автомобильной промышленности во всем мире.

**1979.** Boeing, General Electric и другие компании разрабатывают первый стандарт для обмена инженерными геометрическими данными – формат IGES (Initial Graphic Exchange Standard), который включает в себя спецификацию NURBS кривых и поверхностей (конические сечения, кривые Безье и B-сплайны являются частными случаями NURBS).

*1980-е. Первые системы твердотельного моделирования для UNIX, первые программы автоматизации черчения для PC*

**1980.** Подразделение американского авиастроительного концерна McDonnell Douglas выпускает первую в мире коммерческую систему твердотельного моделирования – Unigraphics. В 1991 г. этот бизнес покупает компания EDS. Спустя еще 10 лет EDS приобретает компанию SDRC, объединяет ее линейку продуктов с Unigraphics и продает объединенную компанию частным инвесторам под именем UGS. Наконец, в 2007 г. компания UGS поглощает немецкий концерн Siemens.

**1980.** Французская компания Matra Datavision выпускает САПР EUCLID, который по мере развития превращается из CAD-системы в интегрированный CAD/CAM/CAE-пакет. В 1998 г. Matra продает этот бизнес Dassault Systèmes.

**1982.** Создание компании Autodesk и выпуск ее первого продукта AutoCAD – первой системы автоматизации черчения для персональных компьютеров, которая долгие годы оставалась (а по некоторым данным остается до сих пор) самой популярной САПР в мире.

**1983.** Начало работы над международным стандартом обмена CAD-данными – STEP, призванного заменить IGES.

**1985.** Компания Shape Data начинает разработку пакета Parasolid – прямого наследника геометрического ядра ROMULUS. В этом же году ведущие сотрудники Shape Data оставляют компанию и создают собственную под названием Three-Space Ltd., которая начинает разработку принципиально нового геометрического ядра – ACIS – совместно с американской компанией Spatial Technology (спустя 15 лет поглощенной Dassault Systèmes). Компания Shape Data через три года поглощается Unigraphics вместе с ее разработкой Parasolid.

**1985.** Эмигрировавший из СССР в США профессор Ленинградского университета Семен Петрович Гейзберг основывает компанию PTC (Parametric Technology Corp.). Выпущенный два года спустя продукт Pro/ENGINEER становится первой в мире системой параметрического проектирования на основе конструктивных элементов.

**1987.** Компания 3D Systems выпускает первые станки для быстрого прототипирования изделий путем изготовления их копий из пластика методом стереолитографии.

**1989.** Компания Deneb Robotics (ныне поглощенная Dassault Systèmes) выпускает первую в мире программу, моделирующую движения человека при работе за станком, положившую начало эргономическому анализу в САПР.

**1989.** Джон Оуэн (John Owen) создает в Кембридже компанию D-Cubed Limited, которая занимается разработкой геометрических программных библиотек, в частности, вычислительных модулей для параметризации двумерных и трехмерных геометрических моделей. Модули D-Cubed используют практически все разработчики САПР. В 2004 г. компанию поглощает UGS (ныне Siemens PLM Software).

**1989.** Создается первая российская софтверная компания, разрабатывающая САПР – АСКОН (Санкт-Петербург) с продуктом КОСМОС. В настоящее время АСКОН является ведущим отечественным поставщиком решений для конструкторско-технологической подготовки производства и управления жизненным циклом изделия.

#### *1990-е. Полноценные САПР на платформе Windows*

**1991.** Компания Autodesk лицензирует геометрическое ядро ACIS у Spatial Technologies для реализации элементарных функций твердотельного моделирования в AutoCAD (а затем – также в пакетах Mechanical и Inventor).

**1992.** Выпускниками МГТУ «СТАНКИН» создана компания Топ Системы, занимающаяся разработкой линейки САПР-решений T-FLEX (на основе ядре Parasolid).

**1993.** Джон Хирштик (John Hirschtick) из компании Computervision вместе с Майклом Пэйном (Michael Payne) из компании PTC основывают собственную компанию – SolidWorks, вскоре поглощенную Dassault Systèmes; ныне одноименная САПР SolidWorks (основанная на геометрическом ядре Parasolid) является одной из самых популярных в мире систем трехмерного проектирования.

**1996.** Компания Intergraph выпускает Solid Edge – трехмерную САПР для платформы Windows NT на геометрическом ядре ACIS. Два года спустя права на Solid Edge перекупила компания UGS, которая перевела систему на собственное ядро Parasolid.

**1998.** PTC поглощает компанию Computervision и выпускает Windchill, систему управления жизненным циклом изделия в среде Интернет.

**1999.** На основе успеха программы AutoCAD в области автоматизации черчения компания Autodesk создала трехмерную САПР Inventor для платформы Windows на основе лицензированного геометрического ядра ACIS, которая в настоящее время составляет серьезную конкуренцию другим популярным САПР среднего уровня – SolidWorks и Solid Edge.

*2000-е. Системы для управления жизненным циклом изделия (PLM)*

**2000.** Бурно растущий рынок средств управления жизненным циклом изделия (включая средства конструирования, инженерного анализа, подготовки производства, управления данными и организации совместной работы) привлекает внимание мирового лидера в области корпоративных программных решений – немецкую компанию SAP, которая выпускает специальный модуль в рамках своего ERP-портфеля.

**2000.** После продажи своего бизнеса по разработке САПР EUCLID в Dassault Systèmes, компания Matra Datavision решает открыть исходный код геометрического ядра, использовавшегося при разработке этой системы, и предоставить его в свободное использование всем желающим. Коммерческое обслуживание компаний, занимающихся разработкой САПР на основе этого ядра, осуществляет специально созданная компания Open CASCADE. S.A.S.

**2002.** После слияния компаний Unigraphics и SDRC объединенная линейка САПР-продуктов получает название NX.

**2003.** PTC выпускает новое поколение своей САПР Pro/ENGINEER под названием Wildfire. Система включает в себя значительно переработанный пользовательский интерфейс и является полностью интегрированной в среду для управления жизненным циклом изде-

ля на основе web-сервисов. Гибкая ценовая политика позволяет Wildfire конкурировать не только с системами верхнего (CATIA, NX), но и среднего (SolidWorks, Inventor, Solid Edge) уровня.

**2004.** Число установленных по всему рабочим мест MCAD-систем достигает 5 миллионов. Самыми популярными семействами продуктов являются Pro/ENGINEER, CATIA, NX, Mechanical Desktop, Inventor, SolidWorks и Solid Edge.

**2004.** Отечественная компания ЛЕДАС выпускает геометрический решатель LGS, который используется для реализации параметрической функциональности в САПР. Первыми клиентами становятся компании Proficiency (Израиль) и ADEM (Россия).

**2007.** Майкл Пэйн (основатель PTC и SolidWorks) создает новую компанию SpaceClaim. Одноименный продукт позиционируется не как конкурент существующим системам механического проектирования, а как полезное дополнение к ним, основанное на возможности прямого редактирования геометрии модели без истории построения (информации о конструктивных элементах).

**2007.** PTC поглощает компанию CoCreate, бывшее подразделение Hewlett Packard, разрабатывающее одноименную САПР на основе методов прямого моделирования.

**2007.** Немецкий концерн Siemens поглощает компанию UGS и объявляет о своем намерении выйти на рынок решений для управления жизненным циклом изделия.

**2007.** Oracle поглощает компанию Agile, известного поставщика решений для управления жизненным циклом изделий, и начинает конкурировать на этом рынке с SAP, альянсом IBM/Dassault, PTC и Siemens.

**2008.** После десятилетней серии крупных поглощений (SolidWorks, Deneb, Smart Solutions, Spatial, ABAQUS, MatrixOne) Dassault Systèmes объявляет о запуске принципиально новой платформы PLM V6, в рамках которой компания собирается реализовать концепцию PLM 2.0, означающую, что все услуги по разработке изделий и управления их жизненным циклом будут доступны в сети для совместной работы с удаленным доступом в режиме реального времени.

**2008.** Siemens PLM Software (бывшая UGS) объявляет о разработке нового поколения средств трехмерного моделирования на основе синхронной технологии, которая в рамках которой конструктор может одновременно работать как с конструктивными элементами, так и напрямую с ее граничными элементами (методом прямого редактирования).

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)