

УДК 658.512.011.56:681.31(075.8)

ББК 22.18

E14

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *И.П. Норенков*;

д-р техн. наук, проф. *В.М. Курейчик*

**Евгеньев Г. Б.**

E14 Интеллектуальные системы проектирования : учеб. пособие / Г. Б. Евгеньев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 334, [2] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3200-4

Изложены теоретические основы создания интеллектуальных систем проектирования, включая онтологию инженерных знаний, функциональное моделирование в стандарте IDEF0, объектно-ориентированный анализ и проектирование в машиностроении с помощью языка UML, основы системологии и многоагентных систем. Описаны разработка методов объектов на основе баз знаний, методы создания интеллектуальных систем конструирования и проектирования технологических процессов.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и аспирантов, изучающих информационные технологии, а также для бакалавров, магистров, специалистов, интересующихся проблемами автоматизации конструирования и технологического проектирования. Будет полезно всем работающим в областях автоматизации управления, консалтинга и реинжиниринга процессов производственных предприятий.

УДК 658.512.011.56:681.31(075.8)

ББК 22.18

ISBN 978-5-7038-3200-4

© Евгеньев Г.Б., 2009

© Оформление. Изд-во МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие .....	5
Список сокращений .....	7
Введение .....	9
<b>1. Теоретические основы интеллектуальных систем проектирования .....</b>	<b>11</b>
1.1. Этапы развития информационных технологий .....	11
1.2. Системная модель САПР. Цели и средства компьютеризации инженерной деятельности .....	15
1.3. Онтология инженерных знаний .....	23
1.4. Язык стандарта IDEF0 для функционального моделирования систем .....	31
1.5. Объектно-ориентированный анализ и проектирование в машиностроении ..	34
1.6. Унифицированный язык моделирования UML .....	43
1.7. Реляционные модели данных и язык UML .....	59
1.8. Основы системологии .....	65
1.9. Многоагентные системы проектирования .....	70
Вопросы для самопроверки .....	78
<b>2. Разработка методов объектов на основе баз знаний .....</b>	<b>79</b>
2.1. Технология экспертного программирования .....	79
2.2. Структурированные порождающие системы .....	98
2.3. Геометрические знания .....	102
2.4. Математические негеометрические знания .....	123
2.5. Интегрирование с использованием систем, основанных на знаниях .....	130
2.6. Хранение и отображение баз знаний .....	141
Вопросы для самопроверки .....	149
<b>3. Методы создания интеллектуальных систем конструирования .....</b>	<b>150</b>
3.1. Структура системы инженерной подготовки производства .....	150
3.2. Модели системы конструирования изделия класса «черный ящик» .....	152
3.3. Системный анализ проектных действий .....	161
3.4. Классификация объектов инженерных знаний в машиностроении .....	168
3.5. Модульное проектирование .....	197
3.6. Методы функционально-структурного анализа и синтеза принципиальных схем изделий .....	209
3.7. Методы поиска лучших решений при проектировании изделий .....	220
Вопросы для самопроверки .....	237

<b>4. Методы создания интеллектуальных систем проектирования технологических процессов</b> .....	238
4.1. Структура системы технологической подготовки производства .....	238
4.2. Модели системы проектирования технологических процессов класса «черный ящик» .....	241
4.3. Структура классов объектов технологических процессов .....	247
4.4. Методы проектирования структуры технологических процессов .....	256
4.5. Методы нормирования технологических процессов .....	278
Вопросы для самопроверки .....	333
Литература .....	334

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

В условиях рыночной экономики конкурентная борьба за потребителей требует от предприятий постоянного обновления выпускаемой продукции, повышения ее качества, максимального удовлетворения пожеланий заказчиков, для чего необходимо сокращать сроки и стоимость инженерной подготовки производства, качественно совершенствовать разрабатываемые проекты.

Эти проблемы может решить принципиально новая информационная технология компьютеризации инженерной деятельности (КИД). В XXI в. – веке информатики – персональным должен быть не только компьютер как техническое средство, но и программное обеспечение (ПО) каждого рабочего места инженера.

Трудоемкость и стоимость проектирования, как и качество его результатов, определяются объемом и глубиной инженерных знаний, заложенных в компьютер. В существующих системах автоматизированного проектирования (САПР) в большинстве случаев инженерные знания остаются вне компьютера. В результате конструктор использует компьютер в примитивном режиме «электронного кульмана», а технолог – в режиме специализированного редактора. При этом, когда инженеру предлагают специализированные системы, знания, заложенные в них программистами с помощью алгоритмических языков, остаются недоступными для понимания и корректировки.

Принципиально новая информационная технология КИД позволяет специалисту в той или иной прикладной области, не обладающему глубокими знаниями в информатике, самому без помощи программистов создавать для себя и своих коллег специализированные рабочие места, используя описанную в этой книге методологию и соответствующие инструментальные программные средства. В этом случае инженерная деятельность претерпевает качественные изменения: специалист вводит в компьютер данные технического задания (ТЗ) и наблюдает за процессом генерации проекта, принимая принципиальные творческие решения посредством выбора из вариантов, предлагаемых компьютером. Подобные системы с полным основанием можно отнести к принципиально новой категории полуавтоматических систем проектирования.

Настоящая книга адресована не только разработчикам САПР, для которых есть соответствующие учебники [24], но и студентам, аспирантам, преподавателям и бакалаврам, магистрам и инженерам всех специальностей, которым необходимо компьютеризировать свою деятельность.

Учебное пособие самодостаточно и не требует каких-либо специальных знаний в области информатики. Оно написано на основе курса лекций, прочитанных автором в 1998–2007 гг. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Цель курса лекций состояла в изучении и освоении системных методов и средств создания интегрированных интеллектуальных систем КИД. В задачи курса входило:

- изучение основ инженерной системологии и методологии компьютеризации инженерных знаний;
- освоение методов и средств разработки и использования концептуальных конструкторско-технологических моделей данных, параметризованных геометрических моделей машиностроительных изделий, конструкторских и технологических баз знаний, интегрированных интеллектуальных конструкторско-технологических систем автоматизации проектирования.

В издании приведены фрагменты конструкторской и технологической баз знаний, так как эти материалы, по мнению автора, являются прототипами инженерных книг завтрашнего дня, которые будут доступны для чтения и понимания человеком, и в то же время могут быть автоматически преобразованы в программное средство для компьютера.

Автор благодарит своих коллег по кафедре «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана за понимание и поддержку идей, изложенных в книге. Особую признательность хочется выразить коллегам, создавшим и развивающим метаинструментальную систему СПРУТ, разработчикам прикладных систем SprutCAD и СПРУТ-ТП, без которых реализовать эти идеи невозможно, а также сотрудникам ЗАО «СПРУТ-Технология» А.Х. Хараджиеву, В.Х. Хараджиеву, А.Н. Пономареву, А.В. Реутову, В.Н. Глушкову и ООО «Центр СПРУТ-Т» Б.В. Кузьмину, Г.В. Серегину, А.А. Кокореву, А.Г. Стисесу, С.С. Крюкову и Н.С. Гришину.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность своей жене Лидии Васильевне Родиной, без доброжелательной поддержки которой эта книга не увидела бы свет.

Хочется верить, что учебное пособие поможет развитию оригинальных российских информационных технологий в промышленности и других секторах экономики. Автор с благодарностью воспримет замечания и пожелания по содержанию книги.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

---

АДО	– активный динамический объект
АС	– автоматизированная система
АСУ	– автоматизированная система управления
БД	– база данных
ВБ	– виртуальное бюро
ЕСКД	– единая система конструкторской документации
ЕСТД	– единая система технологической документации
КБ	– конструкторское бюро
КИД	– компьютеризация инженерной деятельности
МЗ	– модуль знаний
МИЗ	– модуль инженерных знаний
МТП	– метамодель технологического процесса
НИИ	– научно-исследовательский институт
ООА	– объектно-ориентированный анализ
ООП	– объектно-ориентированный подход
ООПИ	– объектно-ориентированное проектирование изделий
ПО	– программное обеспечение
САПР	– система автоматизированного проектирования
СТО	– средства технологического оснащения
СУБД	– система управления базами данных
ТВЧ	– ток высокой частоты
ТЗ	– техническое задание
ТО	– технический объект
ТПП	– технологическая подготовка производства
УП	– управляющая программа
ЧПУ	– числовое программное управление
ЭВМ	– электронная вычислительная машина
ЯФМ	– язык функционального моделирования
CAD	– Computer Aided Design
CALS	– Continuous Acquisition and Life-cycle Support
CAM	– Computer Aided Manufacturing
CAPP	– Computer Aided Process Planning
CASE	– Computer Aided Software Engineering
CIM	– Computer Integrated Manufacturing

*Список сокращений*

---

- ISO – International Organization for Standardization
- HTML – Hypertext Markup Language
- RAD – Rapid Application Development
- SGML – Structured Generalized Markup Language
- UML – Unified Modeling Language
- XML – Extensible Markup Language

## ВВЕДЕНИЕ

---

Мы с вами, уважаемые читатели, свидетели и непосредственные участники перехода человечества от индустриального к постиндустриальному информационному обществу, в котором компьютерные технологии приведут к кардинальным переменам во всех сферах человеческой деятельности.

В информационном обществе в полной мере будет реализован знаменитый тезис: «Знание – сила», сформулированный Ф. Бэконом еще в 1597 г. Персональный компьютер станет основой для компьютеризации инженерной деятельности (КИД), которая, так же как и инженерное образование, будет осуществляться на базе персональных специализированных, объектно-ориентированных интеллектуальных рабочих мест, интегрированных на техническом, программном, информационном, методическом и организационном уровнях в единую проектирующую среду.

В XXI в. конкурентоспособность предприятий и физических лиц будет определяться объемом и качеством информационных ресурсов, которыми они обладают. С точки зрения возможности автоматизированной обработки информационные ресурсы могут быть двух видов: пассивными и активными. Носитель пассивных информационных ресурсов – книга или ее компьютерный простой, гипертекстовой или мультимедийный эквивалент. Доступ к такому ресурсу обеспечивается через человека, что существенно замедляет процесс обработки информации и принятия решения. Активные информационные ресурсы представляют собой формализованные и зафиксированные на машинных носителях профессиональные банки данных и знаний. Они доступны не только для автоматизированного хранения и поиска, но и для обработки с помощью компьютерных технологий.

Активные информационные ресурсы превращают компьютер для инженера в активного партнера, который выполняет всю рутинную расчетную, поисковую и оформительскую работу и помогает принимать проектные решения, оставляя за инженером право на творчество.

Есть основание полагать, что отношение объема активных информационных ресурсов к общему объему национальных информационных ресурсов станет одним из существенных экономических показателей каждой страны. Поэтому КИД необходимо направить не столько на использование готовых активных и пассивных информационных ресурсов, сколько на



создание новых активных ресурсов и перевод пассивных ресурсов в активную форму, внешнее представление которой должно быть удобно для восприятия инженером.

Такой подход позволит аккумулировать инженерные знания и опыт в виде активных информационных ресурсов, избавив инженеров и студентов, решающих конструкторские и технологические задачи, от необходимости изучения алгоритмических языков, которые до последнего времени были единственным средством представления активных информационных ресурсов.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

---

---

## 1.1. Этапы развития информационных технологий

Основной причиной, обусловившей возникновение в XX в. потребности проведения работ по автоматизации проектирования, стала низкая производительность инженерного труда в сфере обработки информации по сравнению с производительностью труда рабочих в материальном производстве. Так, в технически развитых странах с 1900 по 1960 г. производительность труда в производстве возросла в среднем на 1000 %, а в информационной сфере, к которой принадлежит проектирование, – на 20 %. В 1970-х годах эти показатели составили 80 и 4 % соответственно. Такое положение было связано с инструментальнооснащенностью соответствующих работников. В стоимостном отношении до появления персональных компьютеров инструментальнооснащенность служащих, обрабатывающих информацию, была более чем в 10 раз меньше инструментальнооснащенности рабочих, занятых производством материальных объектов [27].

На первых порах эту проблему решали экстенсивным путем за счет перевода трудовых ресурсов из материального производства в сферу обработки информации. Однако это снизило общие темпы роста производительности труда в экономике промышленно развитых стран. В 1990-х годах производительность труда в информационной сфере и, в частности, в области проектирования становится одним из ключевых факторов повышения общественного производства в промышленно развитых странах.

Научно-техническая революция XX в. изменила в геометрической прогрессии следующие показатели развития техники [27]:

- число различных классов технических систем удваивалось в среднем через каждые 10 лет;
- сложность изделий по числу деталей и узлов возрастала в 2 раза через каждые 15 лет;
- объем научно-технической информации удваивался через каждые восемь лет;
- время создания новых изделий уменьшалось в 2 раза через каждые 25 лет, одновременно сокращалось время морального старения изделий.

## 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ БАЗ ЗНАНИЙ

---

### 2.1. Технология экспертного программирования

При ООП к проектированию программных систем существует два относительно самостоятельных и вместе с тем тесно взаимосвязанных вида моделирования: статическое и динамическое. *Статическое* моделирование определяет структуру классов и объектов, а *динамическое* – их поведение. При разработке интеллектуальных систем проектирования в языке UML для статического моделирования используются диаграммы классов и объектов. Для моделирования поведения объектов из арсенала языка UML наиболее подходят диаграммы состояний (см. табл. 1.7). Однако язык UML не располагает объектно-ориентированными средствами динамического моделирования, требуемыми для построения интеллектуальных систем. В связи с этим необходимо модифицировать элементы диаграмм состояний, придав объектный характер действиям (Actions), на базе которых строятся эти диаграммы. При таком подходе действия преобразуются в объект-функции. Такой подход рассмотрен в гл. 2.

В настоящее время промышленно развитые страны испытывают дефицит программистов, который будет возрастать по мере расширения областей применения информационных технологий, использующих активные информационные ресурсы, основанные на знаниях.

Для решения этой важнейшей проблемы есть два основных способа: значительно сократить трудоемкость разработки и отладки программных средств и расширить круг людей, способных выполнять эти функции. Если повысить производительность программирования на порядок и одновременно привлечь к этому процессу дополнительно десятки тысяч специалистов, то проблема дефицита будет снята.

Очевидно, что увеличить производительность программирования можно использованием наиболее перспективных технологий в этой области с дальнейшим их развитием. К таким технологиям принадлежит *объектно-ориентированное программирование* [2, 13].

Расширение круга людей, способных разрабатывать программные средства, должно достигаться привлечением носителей знаний в прикладных областях, не владеющих программированием. Эта задача относится к компе-

### 3. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНСТРУИРОВАНИЯ

#### 3.1. Структура системы инженерной подготовки производства

Конструирование – один из этапов инженерной подготовки производства изделий. Поэтому в начале целесообразно рассмотреть общую модель этого процесса, функциональная схема которого приведена на рис. 3.1.

Исходные данные для проектирования изделия содержатся в ТЗ, которое составляется разработчиком и утверждается заказчиком (рис. 3.2). Проектирование и конструирование изделий выполняется, как правило, расчетчиками и конструкторами основных изделий, предназначенных для поставки потребителям. В результате формируются конструкторская документация и компьютерные модели изделия.

Эта информация является исходной для проектирования технологических процессов производства изделия (см. рис. 3.1), которое выполняется технологами (см. рис. 3.2).



Рис. 3.1. Функциональная схема системы инженерной подготовки производства изделий

## **4. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

---

### **4.1. Структура системы технологической подготовки производства**

Из функциональной модели системы инженерной подготовки производства (см. рис. 3.1) следует, что проектирование и программирование технологических процессов представляют собой этапы, следующие за конструированием изделий. Эти этапы являются основой технологической подготовки производства (ТПП), диаграмма прецедентов которой представлена на рис. 4.1.

В производстве любого типа до начала ТПП должно быть спроектировано изделие. В настоящее время производство в большинстве случаев носит позаказный характер (см. рис. 4.1), при котором также необходимо сформировать заказ, содержащий перечень комплектов, сборочных единиц и деталей, подлежащих изготовлению в заданных количествах. Чтобы определить номенклатуру и общее количество всех деталей, изготавливаемых для выполнения заказа, нужно провести так называемое разузлование. Эту операцию выполняют с использованием спецификаций всех комплектов и сборочных единиц, а также подсчетом общего количества деталей одного обозначения, входящих в разные специфицированные изделия заказа.

После определения полной номенклатуры деталей заказа находят те детали, которые изготовлялись для других заказов и для которых уже разработаны технические процессы. В результате устанавливается множество технологических процессов, подлежащих разработке, и составляются планы их проектирования, выполнение которых должно контролироваться руководителем ТПП.

Далее в соответствии с планом начинается разработка технологического процесса изделия. Для построения интеллектуальных систем проектирования технологических процессов необходимы объектные модели изделий, которые описаны в настоящей главе. В тех случаях, когда маршрутные технологические процессы изготовления деталей состоят из операций обработки на станках с ЧПУ, осуществляется их программирование с использованием геометрических моделей деталей.

Если при разработке технологического процесса технолог в банке данных ресурсов не может найти оснастку (инструменты, приспособления), то он

## ЛИТЕРАТУРА

---

1. *Амиров Ю.Д.* Основы конструирования: творчество – стандартизация – экономика. М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. *Буч Г.* Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Бином; СПб.: Невский диалект, 2000.
3. *Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А.* Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. 2-е изд., стер. М.: ДМК-Пресс; СПб.: Питер, 2004.
4. *Буч Г., Якобсон А., Рамбо Дж.* UML. Классика CS: Пер. с англ. / Под общ. ред. С. Орлова. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006.
5. *Васильев А.Л.* Модульный принцип формирования техники. М.: Изд-во стандартов, 1989.
6. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.
7. *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование: системный подход: Пер. с польск. М.: Мир, 1981.
8. *Дунаев П.Ф., Леликов О.П.* Конструирование узлов и деталей машин. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985.
9. *Евгениев Г.Б., Кобелев А.С.* Многоагентные САПР в машиностроении // Информационные технологии. 2003. № 11. С. 19–24.
10. *Евгениев Г.Б.* Онтология инженерных знаний // Информационные технологии. 2001. № 5. С. 2–5.
11. *Евгениев Г.Б.* Системология инженерных знаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
12. *Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003.
13. *Иванова Г.С., Ничушкина Т.Н., Пугачев Е.К.* Объектно-ориентированное программирование / Под ред. Г.С. Ивановой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
14. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990.
15. *Колесов Ю.Б.* Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.
16. *Кривомазов Д.В., Шалаев П.А.* Стандартизация в области систем автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1987.
17. *Кузьмин Б.В.* Универсальные и инструментальные системы компании «СПРУТ-Технология» // САПР и Графика. 2002. № 9.

## Литература

---

18. *Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004.
19. *Лингер Р., Миллс Х., Уитт Б.* Теория и практика структурного программирования: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
20. *Макетирование*, проектирование и реализация диалоговых информационных систем / Л.И. Гуков, Е.И. Ломако, А.В. Морозова и др.; Под ред. Е.И. Ломако. М.: Финансы и статистика, 1993.
21. *Маталин А.А.* Технология машиностроения. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985.
22. *Машиностроение.* Терминология: справочное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1989. Вып. 2.
23. *Новиков В.К.* Основы теории принятия решений при проектировании. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992.
24. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
25. *Общемашиностроительные* нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч. II. Нормативы режимов резания. М.: Экономика, 1990.
26. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
27. *Половинкин А.И.* Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988.
28. *Попов Э.В.* Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. М.: Наука, 1987.
29. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986.
30. *Проектирование* технологических процессов сборки / Под ред. В.С. Корсакова. М.: Машиностроение, 1985.
31. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002.
32. *Хараджиев А.Х.* Комплексная автоматизация подготовки производства на базе СПРУТ-Технологии // САПР и Графика. 2000. № 11.
33. *Хубка В.* Теория технических систем: Пер. с нем. М.: Мир, 1987.
34. *Шлеер С., Меллор С.* Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях: Пер. с англ. Киев: Диалектика, 1993.
35. *Янг М. Дж.* XML. Шаг за шагом: Пер. с англ. М.: Изд-во ЭКОМ, 2002.

*Учебное издание*

**Евгеньев** Георгий Борисович

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ  
СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Редактор *А.С. Водчиц*

Технический редактор *Э.А. Кулакова*

Художник *Н.Г. Столярова*

Корректор *Е.В. Авалова*

Компьютерная графика *В.А. Филатовой*

Компьютерная верстка *Н.Ф. Бердавцевой*

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Подписано в печать 26.06.09. Формат 70×100 1/16.

Усл. печ. л. 27,3. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

E-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Отпечатано в ГУП ППП «Типография «Наука».

121099, Москва, Шубинский пер., д. 6.