

УДК 004

А.Н. Афанасьев<sup>1</sup>, В.А. Гульшин<sup>2</sup>, Р.Ф. Гайнуллин<sup>3</sup>, С.И. Бригаднов<sup>4</sup>,  
С.Ю. Кириллов<sup>5</sup>, В.С. Хородов<sup>6</sup>

**АРХИТЕКТУРА И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ОБУЧЕНИЯ**

*Разработана обобщенная схема системы анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D. Описаны основные компоненты разработанной автоматизированной комплексной системы, а также описана реализация программного комплекса. Сформирован список компетенций обучаемого проектировщика в области автоматизированного проектирования трехмерных машиностроительных объектов.*

*Автоматизированное проектирование, автоматизированное обучение, САПР КОМПАС-3D, компетенции проектировщика.*

**A.N. Afanasiev, V.A. Gulshin, R.F. Gaynullin, S.I. Brigadnov,  
S.Yu. Kirillov, V.S. Horodov**

**ARCHITECTURE AND STRUCTURAL-FUNCTIONAL DIAGRAM OF  
AN INTELLIGENT COMPLEX SYSTEM FOR THE AUTOMATED  
DESIGN OF COMPLEX TECHNICAL FACILITIES AND TRAINING**

*The generalized scheme of the system of analysis of design solutions made in COMPASS-3D CAD is developed. The main components of the developed automated complex system are described, as well as the implementation of the software complex is described. A list of competencies of the trained designer in the field of computer-aided design of three-dimensional engineering objects.*

*Computer-aided design, computer-aided instruction, COMPASS-3D CAD, competences of the designer.*

<sup>1</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; a.afanasev@ulstu.ru; 88422778846; д.т.н.; профессор.

<sup>2</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; 88422778846; к.т.н.

<sup>3</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; 88422778846; к.т.н.

<sup>4</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; sergbrig@yandex.ru; 88422778846; аспирант.

<sup>5</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; kirillovsyu@gmail.com; 88422778846; начальник НИО ИДДО УлГТУ.

<sup>6</sup> УлГТУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; 88422778846; к.т.н.

## Введение

В настоящее время системы автоматизированного проектирования (САПР) стали неотъемлемой частью работы конструкторов и проектировщиков, дизайнеров и архитекторов. Современные программные комплексы САПР позволяют выпускать проектную документацию, производить инженерные расчеты, осуществлять моделирование и визуализацию в 3D [1].

Обеспечение конкурентоспособности современных промышленных и проектных предприятий (организаций) определяется степенью информатизации производственного процесса, в первую очередь использованием САПР, позволяющих повысить качество проектных решений, сократить сроки проектирования и ресурсы. При этом важными задачами являются оценка и возможность повторного использования проектных решений, эффективность решения которых позволяет улучшить характеристики объектов проектирования, сократить время, затрачиваемое на разработку документации, преобразование данных и поиск информации об изделиях.

САПР КОМПАС представляет собой профессиональную систему трехмерного моделирования, ставшую стандартом для многих промышленных предприятий за счет удачного сочетания простоты освоения и работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования, которые решают большинство основных задач проектировщиков. Система состоит из комплекса средств для работы со сложными проектными решениями, содержащими большое количество элементов. Наличие в составе специализированных приложений и библиотек стандартных элементов, а также расчетных модулей и средств визуализации повышают эффективность работы конструкторов и проектировщиков машиностроительных изделий.

Важнейшей составляющей компетентности специалиста, кроме теоретических знаний, является умение применять эти знания в работе [2]. Современные производства накопили большой опыт решений определённых задач, к сожалению, большинство обучающихся систем не используют реальные задачи при подготовке специалистов, а также не интегрирует базу проектных решений предприятия [3, 4].

Задачи промышленного конструирования требуют наличия определенных компетенций у проектировщика, которые сложно приобрести с использованием классических подходов к обучению. Поэтому создание эффективных методов и средств обучения проектировщика автоматизированному проектированию является необходимым условием для решения и выполнения промышленных задач в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов.

Основной задачей разрабатываемой комплексной автоматизированной интеллектуальной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика является управление процессом его обучения проектной деятельности в САПР КОМПАС-3D [5].

# 1. Концептуальная схема архитектуры интеллектуальной комплексной системы автоматизированного проектирования сложных технических объектов и обучения

Обобщенная схема интеллектуальной комплексной системы автоматизированного проектирования сложных технических объектов и обучения представлена на рис. 1.

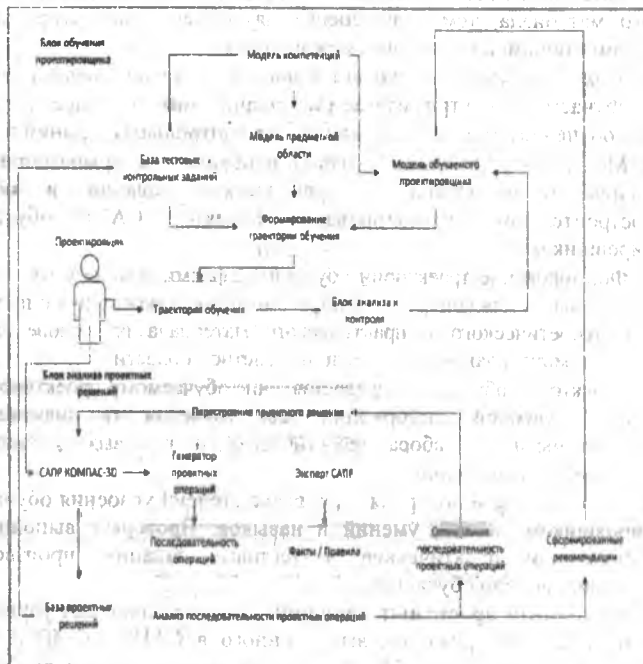


Рис. 1. Схема интеллектуальной комплексной системы автоматизированного проектирования сложных технических объектов и обучения

Система состоит из следующих блоков.

**Блок обучения проектировщика** – предназначен для обучения проектировщика автоматизированному проектированию машиностроительных объектов, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D (формирование учебного материала, контрольных заданий, траектории обучения). Включает в себя следующие компоненты.

♦ База тестовых заданий – теоретический тестовый материал и практические задания для оценки степени усвоения обучаемым проектировщиком знаний, умений и навыков. Практические задания подбираются для обучаемого проектировщика из базы проектных решений.

♦ Модель предметной области – множество дидактических единиц учебного материала, тем и вопросов для изучения проектировщиком, набора компетенций и отношений между ними.

♦ Модель обучаемого проектировщика – хранит цель обучения, знания обучаемого внутри изучаемой дисциплины (текущее состояние процесса обучения), результаты выполнения контрольных заданий и т.д.

♦ Модель компетенций – набор необходимых компетенций для выполнения теоретических и практических заданий в области машиностроительного проектирования объектов САПР обучаемым проектировщиком.

♦ Формирование траектории обучения – формирование оптимального сценария обучения для конкретного обучаемого проектировщика с подбором тестового теоретического и практического материала на основе анализа модели обучаемого и данных из модели предметной области.

♦ Траектория обучения – предоставление обучаемому проектировщику необходимой учебной информации для изучения (в определенной последовательности) и набора теоретических и тестовых заданий для самостоятельного выполнения.

♦ Блок анализа и контроля – проверка степени усвоения обучаемым проектировщиком знаний, умений и навыков. Проверяет выполненные проектировщиком практические и тестовые задания, производится корректировка модели обучаемого.

**Блок анализа проектных решений** – предназначен для управления анализом проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D, с составлением рекомендаций [6, 7] и корректировки модели обучаемого проектировщика с учетом сформированных рекомендаций. Обеспечивает перестроение проектного решения на основе оптимальной последовательности проектных операций. Включает в себя следующие компоненты.

♦ САПР КОМПАС-3D – система автоматизированного проектирования, позволяющая проектировщику создавать двух-, трехмерные объекты машиностроительных изделий.

♦ База проектных решений – хранит информацию о проектных решениях, выполненных в САПР КОМПАС-3D.

♦ Генератор проектных операций – формирует и кодирует последовательность проектных операций обучаемого проектировщика для последующего анализа.

♦ Эксперт САПР – эксперт в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов, формирует правила для анализа проектных решений и подбора необходимых рекомендаций обучаемому проектировщику [8].

♦ Факты / Правила – база фактов, полученная из множества проектных операций и истории построения дерева модели проектного решения.

♦ Анализ последовательности проектных операций – механизм формирования оптимальной последовательности проектных операций на основе имеющихся фактов и правил анализа проектных решений.

♦ Сформированные рекомендации – рекомендации, подобранные обучаемому проектировщику на основе анализа проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D [9].

♦ Оптимальная последовательность проектных операций – последовательность проектных операций с меньшим количеством действий.

♦ Перестроение проектного решения – перестроение трехмерной модели проектного решения, выполненного проектировщиком в САПР КОМПАС-3D, на основе оптимальной последовательности проектных операций. Обновление проектного решения в базе проектных решений.

## **2. Формирование списка компетенций проектировщика в области автоматизированного проектирования трехмерных машиностроительных объектов**

Под термином компетенция проектировщика подразумевается набор теоретических знаний, умений и навыков, а также практического опыта, необходимого для выполнения задач автоматизированного проектирования машиностроительных объектов в САПР.

Для формирования списка компетенций проектировщика были проанализированы следующие профессиональные стандарты, рабочие программы, связанные с проектной деятельностью в САПР:

- ♦ профессиональный стандарт «Конструктор в автомобилестроении»;
- ♦ профессиональный стандарт «Специалист по компьютерному конструированию (автоматизированному производству)»;
- ♦ рабочая программа по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование»;
- ♦ рабочая программа по направлению подготовки «Системы автоматизированного проектирования технологических процессов»;
- ♦ сертификационные тесты от компании АСКОН по направлению «КОМПАС-3D. Машиностроительное направление».

В результате анализа был сформирован следующий список компетенций проектировщика:

- 1) знание общих сведений о САПР;
- 2) знание предметной области автоматизированного проектирования;
- 3) знание общих принципов моделирования;
- 4) умение создавать рабочий чертеж;
- 5) умение создавать сборочную единицу;
- 6) умение создавать сборку изделия;
- 7) умение создавать компонент в контексте сборки;
- 8) умение создавать сборочный чертеж сборочной единицы;
- 9) умение создавать сборочный чертеж изделия;
- 10) умение создавать спецификации;
- 11) навыки твердотельного моделирования в САПР;
- 12) навыки добавления стандартных изделий;
- 13) навыки использования тел вращения;
- 14) использование методик проектирования в САПР;
- 15) навыки коллективной работы над проектным решением;
- 16) умеет использовать элементы по сечениям;
- 17) умеет использовать пользовательские библиотеки трехмерных моделей;
- 18) навыки построения листовых деталей;
- 19) способен построить трехмерную модель по плоскому чертежу;
- 20) навыки построения кинематических компонентов и пространственных кривых.

Выделенные компетенции были структурированы в 3 основных блока: знания, умения и навыки проектировщика. Каждый блок является многоуровневым, имеется возможность освоения нового уровня знаний, умения и навыков проектировщиком (табл. 1).

### 3. Реализация программного комплекса анализа проектных решений

Автоматизированная система анализа проектных решений (рис. 2), выполненных в среде САПР КОМПАС, состоит из следующих частей:

- 1) генератора операций;
- 2) системы поиска неоптимальных проектных операций;
- 3) системы классификации изделий машиностроительных объектов.

Генератор операций реализуется на платформе .NET Framework с использованием API-интерфейса (технология OLE Automation). Основная задача – перевод проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС, в последовательность проектных операций в формате eXtensible Markup Language (XML).

Таблица 1

## Пример матрицы компетентности проектировщика

Компетенция	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
<b>Твердотельное моделирование в САПР</b>	Может произвести предварительную настройку САПР. Планирует процесс построения детали	Работает в режиме отображения эскиза. Применяет параметризацию в эскизах и представляет размеры. Применяет операцию «выдавливание». Управляет ориентацией модели в трехмерном пространстве	Создает зеркальные массивы, добавляет скругления. Рассчитывает МЦХ сборки или детали. Рассечение модели плоскостями	Простанавливает размеры, обозначения, технические требования в проектном решении
<b>Коллективная работа над проектным решением</b>	Может создавать локальную систему координат движущихся компонентов	Может определить структуру изделия, создавать коллекции и файл окончательной сборки	Может размещать модели компонентов в сборке	Контролирует результат сборки, может спроектировать компоненты
<b>Построение трехмерной модели по плоскому чертежу</b>	Не может построить трехмерную модель по чертежу	При построении трехмерной модели использует буфер обмена	Использует автоматическую параметризацию эскиза	Использует ручную параметризацию эскиза

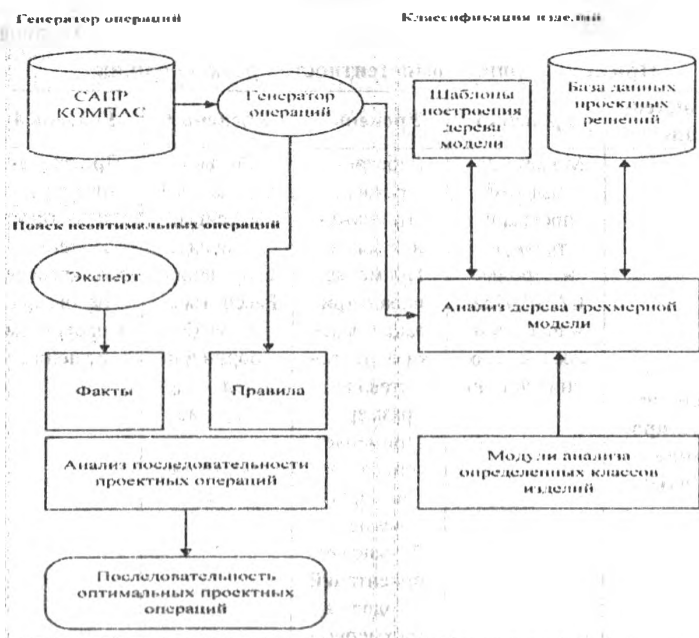


Рис. 2. Структурная схема системы анализа проектных решений

Генератор операций поддерживает анализ операций твердотельного моделирования, представленных ниже.

1. Построение геометрических объектов: точки, прямые, отрезки, окружности, эллипсы, дуги, многоугольники, ломаные, кривые Безье, NURBS.

2. Операции твердотельного моделирования: выдавливание, вращение, кинематическая, по сечениям-эскизам, булева операция, отсечение, скругление, фаска, круглое отверстие, уклон.

3. Построение массивов: по сетке, по концентрической сетке, вдоль кривой, по точкам, по таблице, зеркальный, по образцу.

4. Построение сопряжений: совпадение, касание, соосность, параллельность, перпендикулярность, расстояние, угол.

Система поиска неоптимальных операций реализована на платформе Ruby, что позволяет быстро вносить новые правила для поиска. Исходными данными для поиска неоптимальной последовательности проектных операций является XML-описание, полученное от «Генератора операций». Поиск правила, которое соответствует последовательности операций,



осуществляется перебором из базы правил. Используется шаблон правила, предложенный в методе структурно-параметрического анализа проектных решений: тип операции, условие срабатывания правила и описание правила. При нахождении неоптимальной последовательности проектных операций производится ее замена на последовательность с меньшим количеством действий, а также формируется рекомендация проектировщику.

Система классификации изделий машиностроительных объектов состоит из шаблонов построения деревьев для определенных классов изделий, различных модулей анализа классов изделий и базы данных со списком изделий и перечнем их параметров. В базе данных хранятся проектные решения, выполненные в САПР КОМПАС со списком геометрических параметров (основных и дополнительных), свойственных определенному классу изделия. Поиск по базе изделий осуществляется в соответствии с условиями, которые задает пользователь системы: выбор класса изделия, выбор параметра для поиска, значение параметра.

Разработанная система обеспечивает управление анализом проектных решений, позволяет классифицировать изделия машиностроительных объектов, а также имеет возможность просмотра рекомендаций [10, 11]. Интерфейс программы поддерживает следующие режимы работы:

- 1) построение дерева модели – автоматизированное создание справочника к сборке/детали, который содержит дерево построения трехмерной модели и описание проектных операций;
- 2) анализ проектного решения – запуск анализа проектного решения с составлением рекомендаций по каждой детали, перестроение проектного решения на основе сформированных рекомендаций;
- 3) анализ изделий – состоит из различных модулей анализа определенных классов изделий;
- 4) поиск по базе данных изделий машиностроительных объектов.

Режим «Построение дерева модели» обеспечивает автоматическое построение модели предметной области на основе анализа сборки САПР КОМПАС-3D. Модель предоставлена в виде справочника сборки/детали, включающего:

- ◆ дерево построения;
- ◆ описание операций и их параметров.

Режим «Анализ проектного решения» обеспечивает формирование рекомендаций на основе анализа проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D. Результаты добавляются в индивидуальный список рекомендаций и выводятся проектировщику на экран. На основе сформированного списка рекомендаций осуществляется автоматизированное перестроение проектного решения и отображение его в среде САПР КОМПАС-3D.

Режим «Анализ изделий» позволяет структурировать и классифицировать выбранные пользователем файлы изделий машиностроительных объектов.

Режим «Поиск изделий по БД» позволяет найти те готовые проектные решения, которые удовлетворяют условию поиска: класс изделия, параметр для поиска, значение параметра и критерий поиска (больше, меньше, равно).

### Заключение

Разработана архитектура и структурно-функциональная схема интеллектуальной комплексной системы автоматизированного проектирования сложных технических объектов и обучения проектировщика процессам автоматизированного проектирования машиностроительных изделий.

Система поддерживает персонализированное обучение проектировщика практическим задачам, освоение компетенций проектировщиком, а также позволяет оптимизировать и классифицировать проектные решения с целью сохранения и повторного использования в процессах конструирования машиностроительных изделий.

Исследования поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.1615.2017/4.6. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732152.

### Библиографический список

1. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Интеллектуальная обучающая система концептуальному проектированию автоматизированных систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 4-2. – С. 465-468.
2. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Компонентная автоматизированная обучающая система САПР на основе гибридной нейронной сети // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 3. – С. 14-18.
3. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Организация когнитивной автоматизированной системы (КАОС) промышленных пакетов САПР // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. – Т. 16, № 1. – С. 405.
4. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Разработка компонентно-сервисной платформы обучения: анализ и разработка компонента метода диагностики проектных характеристик обучаемого инженера с помощью диаграмм UML // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2012. – № 4 (60). – С. 43-46.
5. Войт Н.Н., Афанасьев А.Н. Разработка алгоритмического, методического и информационного обеспечения АОС для САПР КОМПАС-3D // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2005. – № 3 (31). – С. 50-56.
6. Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И. Рекомендательная система для САПР КОМПАС // В сборнике: Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016) труды XVI-ой международной молодёжной конференции. – 2016. – С. 33-36.

7. Бригаднов С.И. Разработка пользовательского интерфейса рекомендательной системы для САПР КОМПАС-3D // Электронное обучение в непрерывном образовании. – 2017. – № 1 (4). – С. 48-53.
8. Бригаднов С.И. Анализ экспертных систем // В сборнике: Информатика, моделирование, автоматизация проектирования IX Всероссийская школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых: сборник научных трудов. – 2017. – С. 93-100.
9. Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И. Разработка экспериментальной компьютерной программы «Рекомендательная система для САПР КОМПАС-3D» // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2017. – № 4 (80). – С. 33-36.
10. Бригаднов С.И., Уханова М.Е., Ионова И.С., Игонин А.Г. Разработка базы проектных решений машиностроительных объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 79-85.
11. Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И., Канев Д.С. Разработка автоматизированной системы анализа проектных решений в САПР КОМПАС-3D // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 1 (51). – С. 108-117.