

УДК 629.7.01

РОБОТ-ПРОЕКТАНТ: ФАНТАЗИЯ И РЕАЛЬНОСТЬ

Н.М. Боргест, А.А. Громов, А.А. Громов, Р.Х. Морено, М.Д. Коровин, Д.В. Шустова,
С.А. Одинцова, Ю.Е. Князихина

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
borgest@yandex.ru

Аннотация

Концепция создания автоматизированных систем проектирования (САПР) на основе технологии искусственного интеллекта (ИИ) активно разрабатывалась в конце 80-х начале 90-х на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института имени академика С.П. Королева (ныне СГАУ), получив в то время высокую оценку специалистов (см. например, «От редакции» в журнале «Онтология проектирования» № 2, 2012). Результаты этих работ были опубликованы в работе Боргеста Н.М. «Автоматизация предварительного проектирования самолета» в 1992 году. К сожалению, произошедшие в стране перемены приостановили эти исследования, которые возобновились лишь с открытием на кафедре новой специальности («Автоматизированное управление жизненным циклом продукции») и постановки соответствующих дисциплин (в том числе «Онтология производственной сферы», а также «Онтология проектирования» для магистров по направлению «Авиастроение»). В статье представлен современный взгляд на возможность создания автоматических проектантов и приведены полученные авторами результаты по реализации подобных систем на примере предварительного проектирования самолета.

Ключевые слова: робот-проектант, 3D модель, CAD, матрица проекта, тезаурус, самолет.

Люди с психологией машинопочклонников часто питают иллюзию, будто в высокоавтоматизированном мире потребуется меньше изобретательности, чем в наше время; они надеются, что мир автоматов возьмет на себя наиболее трудную часть нашей умственной деятельности – как тот греческий философ, который в качестве римского раба был принужден думать за своего господина. Это явное заблуждение.

Норберт Винер
«Творец и робот»

Введение

В любой деятельности человека элемент творческого созидания всегда сочетается с элементом рутины. Потребность в творчестве – неотъемлемая черта человека, который стремится к минимизации времени, уделяемого рутине. Для одновременного повышения эффективности труда и роста удовлетворенности от его результатов человек изобретает все новые и новые способы машинного выполнения рутинной работы – от гончарных кругов до сложнейших программно-аппаратных комплексов.

В то же время можно отметить, что процессы автоматизации и роботизации совсем не обязательно превращают деятельность человека в рутину. Уже сейчас в странах, где роботизация и автоматизация производства, включая офисный, управленческий труд, находятся на достаточно высоком уровне и носят массовый характер, отчетливо прослеживаются тенденции, содействующие творчеству как отдельных работников, так и более высокой творческой ориентации целых коллективов. Это наглядно видно, например, в промышленности Японии [1]. На многих предприятиях с ослаблением вертикального построения систем управления со строгой иерархией развивается горизонтальное взаимодействие. Это позволяет отдельным производителям и коллективам постоянно заниматься творческим усовершенствованием технологического процесса, изделий, форм организации и т. д. Можно уже сейчас констатировать, что роботизация и автоматизация совсем не ведут к монотонности, однообразию трудовых процессов и снижению творческого потенциала работников.

1 Обзор систем интеллектуальной поддержки

С развитием вычислительной техники, как аппаратного, так и программного её компонентов, становится возможной автоматизация широкого круга задач, ранее считавшихся доступными исключительно человеку – моделирование целесообразного поведения, решение задач распознавания объектов, решение задач по принятию решения и т. п.

Основой автоматизации подобных процессов является эвристическое программирование, состоящее в построении алгоритмов и программ на основе анализа деятельности человека при решении таких задач. Человек формирует решение на основе анализа модели проблемной ситуации, над которой он может проводить необходимые операции (обобщение, абстрагирование, индуктивные построения, рассуждения по аналогии и т. д.). Современный уровень развития вычислительных средств не позволяет осуществить отображение в памяти машины адекватной модели внешнего мира, поэтому машина может только имитировать творческую деятельность, исполняя заложенный в нее алгоритм. Однако помощь машины может оказаться очень полезной при организации перебора, позволяющего находить различные варианты решения творческой задачи. Для того чтобы деятельность машины была эффективной, необходимо тщательно изучить алгоритмизируемый процесс и выявить все основные приемы, использование которых может привести к цели. На основании данного принципа было построено несколько успешных систем, занимающихся, например, научной деятельностью.

DENDRAL – компьютерная программа, разработанная в 60-е годы XX века, которая использовала знания в области химии для анализа результатов работы масс-спектрометра. В ней применялся эвристический алгоритм поиска химических соединений, ответственных за определенную часть спектра. Это первая программа, предназначенная для автоматизации научной деятельности. Её модификация Meta-DENDRAL стала первой экспертной системой научного формулирования гипотез [2].

EURISKO – эвристическая система искусственного интеллекта, разработанная в 1970-е годы для проведения математических исследований. В частности, при помощи данной системы успешно решались задачи оптимизации структуры микроконтроллеров [3].

KEKADA – еще один пример эвристической системы, способной выдвигать гипотезы и планировать эксперименты. С использованием данной системы было смоделировано открытие Кребсом мочевины [4]. Недостатком этой системы, как и вышеперечисленных, было недостаточное количество информации в её базе знаний и необходимость добавления дополнительной эвристики для продолжения исследований.

BACON [5], ABACUS [6], Fahrenheit [7] и IDS [8] - это автоматические системы, способные на основании введенных данных или математического описания эксперимента формулировать научные законы в форме алгебраических уравнений. Существуют более современные системы, которые используют итеративные циклы для получения законов движения тел по результатам наблюдения за перемещением объекта [9].

Важным этапом в создании полноценного робота-ученого является реализация самообучения, когда робот в состоянии осуществлять коррекцию собственного алгоритма работы на основе полученных им самим данных.

Современные вычислительные системы нуждаются в развитых базах данных. Научная деятельность все больше и больше зависит от эффективного управления данными [10]. Формализованная запись экспериментальных данных и метаданных позволяет создавать более качественные модели, а также упростить повторное использование подобной информации.

Полная автоматизация робота-ученого требует реализации замкнутого циклического обучения (рисунок 1), когда компьютер не только анализирует результаты, но и способен использовать информацию, полученную в процессе собственной работы, для коррекции своего

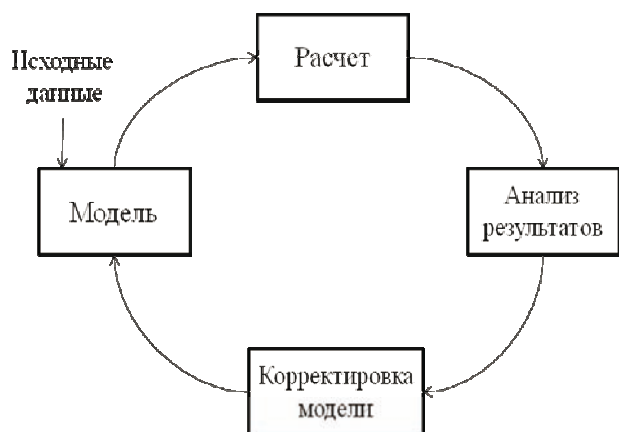


Рисунок 1 – Замкнутый цикл обучения

поведения на следующем цикле выполнения задачи [11].

Подобные системы имеют ряд преимуществ перед человеком: их поведение формализовано и полностью документировано, они могут предоставлять полное описание процесса принятия того или иного решения, они способны обрабатывать огромные объемы информации с использованием сложных моделей и получать результат в короткие сроки и им не нужно отдыхать.

Одним из наиболее результативных современных роботов – исследователей является Adam – робот для биомедицинских исследований. Его первый вариант был построен в

2005 году. Помимо программной части робот имеет в своем распоряжении специальный набор лабораторного оборудования, с которым он взаимодействует при помощи трех «рук».

Adam выдвинул 20 гипотез и успешно подтвердил 12 из них [12]. Для классификации и формализации данных, полученных при экспериментах Adam, используется онтологическая система LABORS, представляющая собой переработанный под специфику работы робота вариант системы EXPO на основе языка OWL [13].

Системы интеллектуальной поддержки не ограничиваются роботами-исследователями. В последние годы системы автоматического проектирования находят все более и более широкое применение в промышленности, особенно в области проектирования электроники. Компания Intel более 25 лет занимается созданием автоматов, которые бы могли проектировать многослойные процессоры [15]. Автоматические системы поддержки механического проектирования в настоящее время существуют лишь в виде небольших систем, содержащих полностью параметризованные описания относительно простых объектов (кронштейнов, элементов крепежа, баков) [16, 17].

Наряду с «тяжелыми» системами интеллектуальной поддержки в предметных областях научных исследований и проектной деятельности, в последнее время интенсивно развиваются системы интеллектуальной поддержки повседневных тривиальных действий, реализуемых, как правило, на основе мобильных платформ. В качестве ярких примеров можно отме-

тить проект Siri компании Apple и множественные проекты на платформе Android, например разработанный компанией iFree «мобильный интеллектуальный помощник». Подобные системы позволяют взаимодействовать с телефоном в режиме диалога, в автоматическом режиме распознавая и выполняя запросы пользователя [26].

2 Автоматическое проектирование

2.1 Обзор подходов к автоматическому проектированию

Современный подход к проектированию требует постоянного повышения эффективности, как в сокращении сроков разработки, так и в повышении качества изделия. Уже в последние десятилетия 20 века фокус в проектировании самолета от классического «дальше, быстрее, выше несмотря на затраты» сместился к максимальному повышению экономической эффективности при высоких показателях экологичности.

Одновременно существует два тренда – повышение сложности самолетов и рост потребности в модификациях под конкретных пользователей. Усложнение задач, стоящих перед конструкторами, требует новых подходов к проектированию.

Появление первых программ для автоматизации проектирования относится к началу 60 годов. За время, прошедшее с момента своего появления, САПР непрерывно развивались – появлялась и усложнялась машинная графика, повышалась точность и эффективность вычислительных алгоритмов, отдельные программы для решения частных задач объединялись в сложные программные системы, расширялась область применения САПР.

Современные САПР из инструмента постепенно становятся «партнером» проектанта. Высокая степень формализации процессов проектирования позволяет компьютерным системам выполнять все больший и больший набор функций. На сегодняшний день умение работать с САПР – необходимый навык современного инженера. Современные САПР – программные комплексы, имеющие, как правило, сложный интерфейс, что значительно усложняет процесс их освоения. Для преодоления этой проблемы ведущие разработчики САПР ставят перед собой задачу разработки системы, способной общаться с пользователем на тривиальном языке с минимальным использованием классических оконных интерфейсов. Важной при этом видится задача создания системы, способной к взаимодействию именно на тривиальном языке, что требует внедрения в процессор распознавания речи специфического набора синонимов и профессионализмов, которые бы значительно повысили легкость освоения системы. Исследователи из Университета Гонконга [14] предложили следующую схему реализации общения между САД системой и проектантом (рисунки 2).

Переход от формального к тривиальному языку общения с САПР позволяет значительно повысить привлекательность и эффективность системы в первую очередь за счет резкого снижения времени, потребного на её освоение. На сегодняшний момент обучение пользователю САПР может занимать значительное время и требовать от пользователя помимо общих инженерных навыков наличия специализированных знаний, касающихся взаимодействия с САПР.

Для современных САПР характерно использование элементов искусственного интеллекта. К сожалению, текущий уровень развития вычислительных средств не позволяет создать систему на основе искусственного интеллекта, которая бы была в состоянии синтезировать принципиально новые решения. Для создания такой системы необходимо качественное изменение архитектуры компьютеров. Современные вычислительные средства позволяют эффективно решать задачи выбора из заранее представленных вариантов и оптимизации под конкретный случай, что вполне достаточно для решения практических задач.



Рисунок 2 – Модель голосового управления САД системой на тривиальном языке

При условии достаточной формализованности процесса, уже сегодня можно создать компьютерную систему, которой по силам параметрическая, в том числе и структурная оптимизация неких заранее описанных моделей объектов, систем и процессов. Оптимизация происходит в заданном направлении, при этом из метамодели изделия, которая создается заранее и включает в себя множество возможных интерпретаций конечного изделия, постепенно выделяется конкретное представление (изделие), максимально удовлетворяющее заданным условиям. Известно, что конструирование - это сфера деятельности, в которой широко применяются эвристические решения, что значительно усложняет задачу создания систем автоматического проектирования. Однако, при тщательном рассмотрении, оказывается, что для типовых изделий, незначительно отличающихся от вариации к вариации, возможно создание полного формального описания процесса проектирования. Для большинства ситуаций выбора существует возможность предварительного задания поведения системы на основе определенных критериев. В итоге система, не обладающая интеллектом, все же может решать задачи, обычно относящиеся к задачам, решаемым исключительно человеком.

Таким образом, можно переложить часть рутинной работы проектанта с человека на вычислительный комплекс, оставив человеку принятие ключевых решений и общий контроль за проектированием с возможностью коррекции процесса в любой момент времени. Реализация такой системы невозможна без глубокой проработки метамodelей, осуществляемой на этапе подготовки системы к расчету. Создание таких метамodelей – задача, требующая высокой квалификации и опыта, так как свойства метамodelи в значительной степени определяют функциональные возможности работа – проектировщика.

2.2 Преимущества автоматического проектирования

Внедрение автоматических систем - это сложный и дорогостоящий процесс, иногда требующий значительных затрат времени, однако автоматизация часто возникающих типовых задач способна значительно повысить временную и экономическую эффективность работы проектанта. Применение систем автоматического проектирования в некоторых областях позволяет снизить время, потребное для разработки стандартных деталей на 95%. Высокая эффективность автоматических САД систем достигается благодаря следующим преимуществам [16-18]:

- сокращение времени на проектирование;
- сокращение времени на проработку (моделирование, чертежи, спецификации);
- сокращение количества ошибок (отсутствие ошибок при выверенном алгоритме) / снижение негативного влияния человеческого фактора;
- освобождение инженеров от выполнения повторяющихся типовых задач;
- возможность в кратчайшие сроки получать приблизительный анализ стоимости изделия;
- возможность за минуты получать САД модели и чертежи;
- возможность закладывания в модель корпоративных стандартов и принципов проектирования, уменьшение влияния личности проектанта на характеристики конечного продукта;
- возможность участия специалистов, не владеющих навыками работы с САД/САЕ системами;
- простота обмена информацией между отделами;
- возможность удаленной работы с системой через компьютерные сети;
- простота управления данными;
- простота отслеживания хода проектирования;
- автоматизация процесса в целом эффективнее автоматизации отдельных его составляющих;
- возможность накопления статистических данных в системе для повышения её эффективности.

На сегодняшний день существует несколько систем-помощников проектанта разной степени автоматизации – от реализации отдельных этапов до систем, в автоматическом режиме производящих все расчеты и выдающих пользователю готовые наборы чертежей как результат своей работы. К сожалению, полностью автоматические системы существуют пока только для относительно простых изделий (кронштейны, балки и т.п.).

3 Робот–проектант самолета

В качестве предметной области для реализации робота-проектанта (РП) было выбрано предварительное проектирование самолета. С одной стороны - это сфера деятельности, которая всегда требовала творческих решений, с другой – многие процедуры и операции на этом этапе проектирования достаточно хорошо формализованы и алгоритмизированы. Результатом работы РП является модель изделия. Она состоит из двух взаимосвязанных частей – матрицы проекта с логикой расчета (в текущем варианте выполненной на основе таблиц MS Excel) и параметризованной трехмерной модели, которая автоматически меняет собственную конфигурацию в зависимости от данных, содержащихся в матрице проекта [23].

Стадия предварительного проектирования включает разработку общей концепции проектируемого объекта, составление концептуальных моделей элементов объекта, формирование технико-экономического обоснования, формирование задания на проектирование, подготовку проектного процесса [24].

Описание объекта, формируемое на стадии предварительного проектирования, включает его конструктивную схему, приближенные оценки массы и габаритных размеров, энергопотребления, показателей надежности. В ответственных случаях необходимо изготовление и испытание макетных образцов проектируемых изделий.

Робот-проектант – это компьютер с периферийными устройствами, инструментариим, включающие в себя речевые программы, языки описания, СУБД, САД системы, редакторы онтологий, и база знаний, как совокупность тезауруса, баз данных, правил и процедур, включая нормативные документы и стандарты, со сценариями проектирования.

На рисунке 3 представлена структурная схема работы робота-проектанта [19]. Предполагается, что робот-проектант может работать в автоматическом режиме или в режиме интеллектуального помощника проектанта-человека. При этом степень участия человека в процессе расчета не является постоянной величиной и зависит от желания конкретного пользователя. Иными словами, для каждого оператора предварительно или динамически в процессе работы создается сценарий общения, включающий в себя степень автоматизации расчета, выбор предпочтительных устройств ввода-вывода данных, необходимость выполнения тех или иных этапов расчета. Таким образом, вид интерфейса робота-проектанта зависит от предпочтений конкретного пользователя.

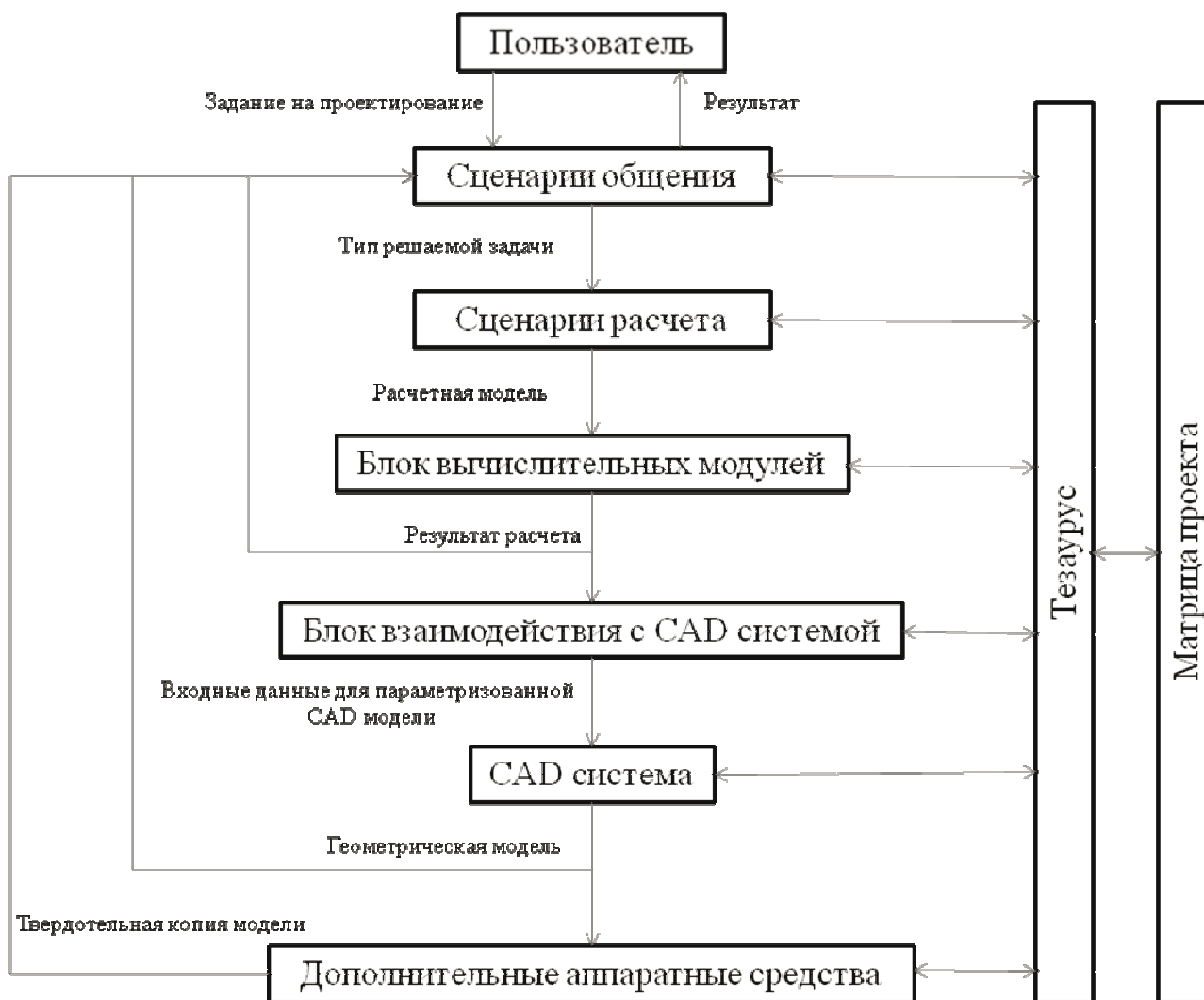


Рисунок 3 - Структурная схема робота-проектанта

3.1 Матрица проекта

Математическая модель объекта хранится в виде матрицы проекта. Матрица проекта содержит в себе все описание объекта, соответствующее определенному этапу его проектирования. Структура матрицы проекта контурно напоминает морфологическую таблицу, позволяющую вместить все возможные реализации проектируемого объекта.

Существует несколько способов заполнения матрицы проекта, аналогичных способам получения необходимой информации конструктором-человеком: использование внешних баз данных – для нахождения справочной информации; выбор информации на основе трендов, построенных на основании статистики; математический расчет необходимых параметров летательного аппарата на основе выявленных физических закономерностей и зависимостей.

Заполнение матрицы начинается с внешних параметров из технического задания на проектирование самолета. РП в автоматическом режиме инициирует выполнение определенных модулей по мере доопределения их входных данных, то есть, как только в матрице появляется достаточно данных для выполнения некоторого модуля, он начинает выполняться. Выполнение независимых модулей может идти параллельно.

Структура матрицы проекта формируется динамически, то есть количество и длина её строк являются переменной величиной, зависящей от текущей интерпретации метамодели (рис. 4)

В силу того, что процесс проектирования всегда является итерационным, матрица проек-

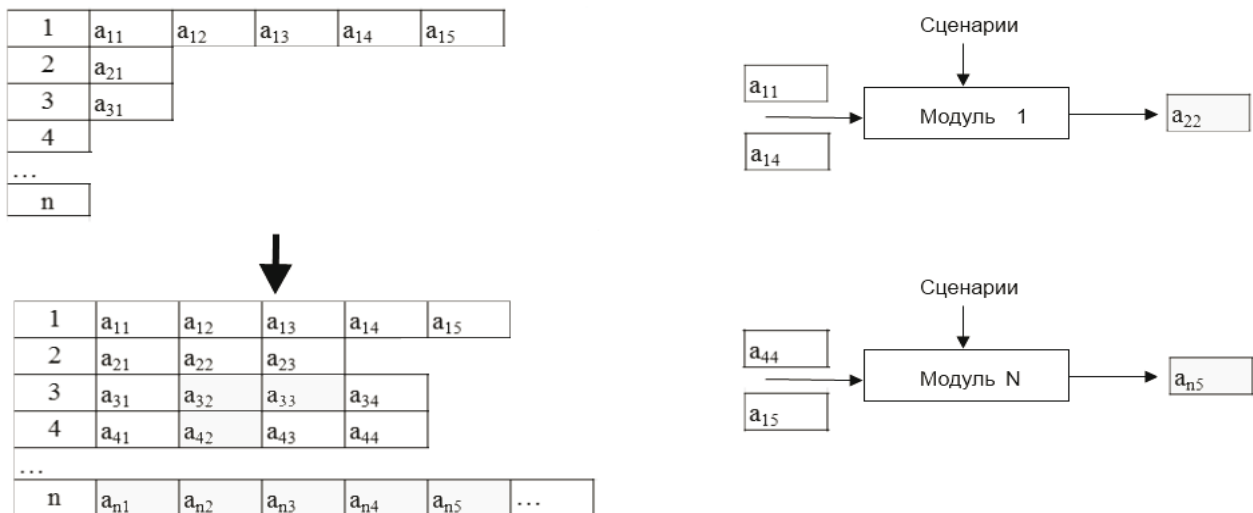


Рисунок 4 – Пример процесса заполнения матрицы проекта

та имеет динамически меняющуюся структуру. С целью предотвращения неоднозначности её интерпретации необходимо обеспечение семантически и синтаксически точной идентификации её данных. Использование данных, полученных при неизвестных (неоговоренных) условиях, приведет к неверной оценке самих этих данных и, в итоге, к неверной результатов проектирования [25].

3.2 Тезаурус

В качестве основы метамодели используется тезаурус предметной области. Тезаурус представляет собой систематизированную совокупность понятий определенной отрасли науки, отражающих логические связи между терминами (рисунок 5). Эти связи основываются на классовой иерархии, родо-видовых и ассоциативных связях.

Тезаурус дает единые, исчерпывающие и непротиворечивые данные о конкретном объекте.

Целями использования тезауруса в РП являются [20, 21]:

- обеспечения общей терминологии для предметной области с целью совместного использования всеми пользователями;
- получение точных и непротиворечивых определений каждого термина;
- обеспечение задания семантики с помощью множества аксиом, которые автоматически позволяют получать ответ на множество вопросов о предметной области

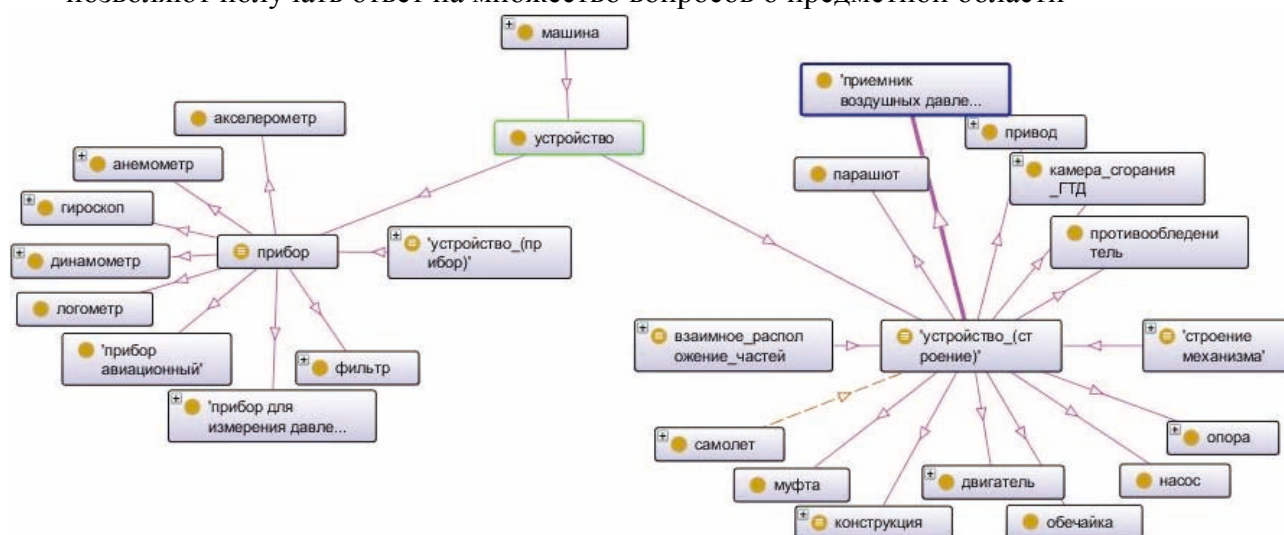


Рисунок 5 – Пример классов тезауруса «Предварительное проектирование самолета» [21]

Помимо задач интеграции тезаурус может использоваться как основа для реализации голосового интерфейса. Содержимое тезауруса может быть использовано в качестве ключевых слов для подпрограммы голосового взаимодействия. При этом возникает ряд проблем, в частности, наличие в предметной области сущностей, обозначаемых одним словом, но имеющих разные значения. Для облегчения работы с синонимами и решения вопросов, касающихся эквивалентности классов в данном случае, было решено указывать значение, в котором употребляется данный термин, с помощью пояснительных слов. На рисунке 6 приведен пример использования пояснительных слов для класса «Устройство».

Таким образом, в графическом виде класс «Устройство» как «прибор» и как «строение механизма», будет иметь следующий вид (см. рисунок 5). Использование пояснительных слов является рациональным способом выхода из ситуации, когда имеются два или более синонимичных слова (см. рисунок 6).

Тезаурус, несмотря на использование ГОСТов, ОСТов и профессиональных словарей, является субъективным продуктом, так как у каждого человека существует собственное представление предметной области. Для повышения эффективности работы системы и защиты от ошибок, вызванных отсутствием семантической определенности или её ошибочной интерпретации, необходимо обеспечивать подстройку тезауруса под конкретного пользователя, включая режимы обучения пользователя и самообучения системы.

Заполнение матрицы проекта в автоматическом режиме предполагает реализацию подсистемы интеллектуальной обработки информации и интеллектуального поиска в базах данных. Это накладывает определенные ограничения на структуру и объем баз данных – с одной стороны, они должны быть достаточно объемными для отыскания в них закономерностей, с другой - не должны быть слишком большими, так как это значительно увеличит время на их обработку.

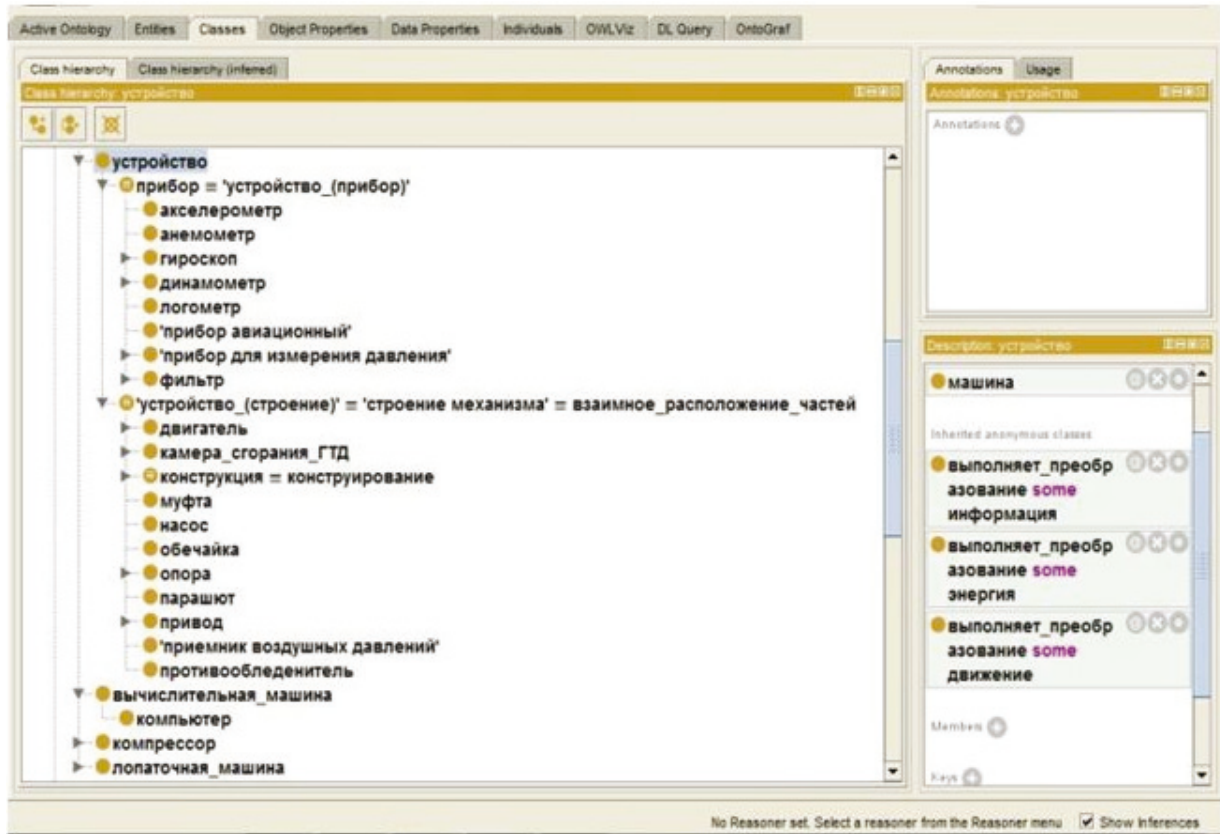


Рисунок 6 – Пример использования пояснительных свойств для класса «устройство» [21]

3.3 Интерфейс



Рисунок 7 – Общий вид многоэкранный интерфейс робота-проектанта самолета

На рисунке 7 представлен общий вид интерфейса робота-проектанта. Робот-проектант имеет несколько возможных способов общения с пользователем – помимо классического управления при помощи мыши и клавиатуры реализуется голосовое управление посредством имеющегося программно-аппаратного обеспечения.

Многоэкранный интерфейс позволяет одновременно контролировать множество параметров расчета и, при необходимости, вносить в процесс собственные коррективы. Проектирование - процесс всегда итерационный. Это связано с тем, что начиная от этапа постановки задачи, до принятия окончательных решений невозможно определить и согласовать все взаимосвязанные и взаимозависимые данные между собой. Отсюда потребность для проектанта иметь возможность видеть весь процесс проектирования объекта или в нашем случае – процесс заполнения матрицы проекта [22].

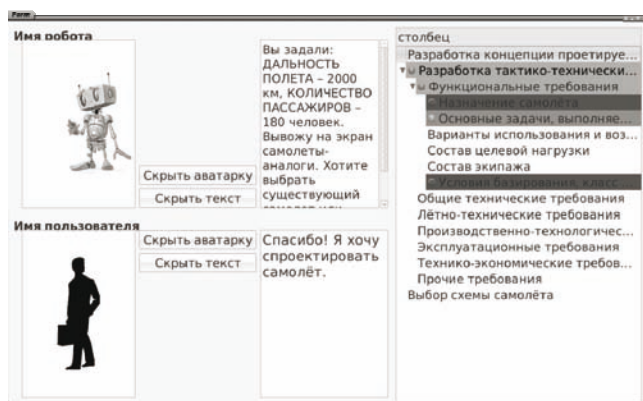


Рисунок 8 – Экран диалога

Следующий экран (рисунок 9) – экран прототипов. На нем отражены возможные готовые решения сформулированной на первом экране проблемы, найденные роботом-проектантом в собственной базе данных. В случае, если пользователя удовлетворяет предлагаемый вариант, найденное решение принимается в качестве финального результата. Если же пользователя не устраивают готовые решения, робот-проектант инициирует выполнение предварительного проектирования конструкции с учетом предпочтений пользователя.

Если в процессе работы робота-проектанта возникает необходимость принятия решения человеком, система предоставляет ему необходимую для этого информацию, обработанную для максимально наглядного представления. Например, РП демонстрирует основные тренды зависимостей между определенными параметрами (см. рисунок 10). Проектант, наблюдая принятые на основе обработанной статистики значения параметров и понимая суть решаемой задачи, имеет возможность внести свои коррективы.

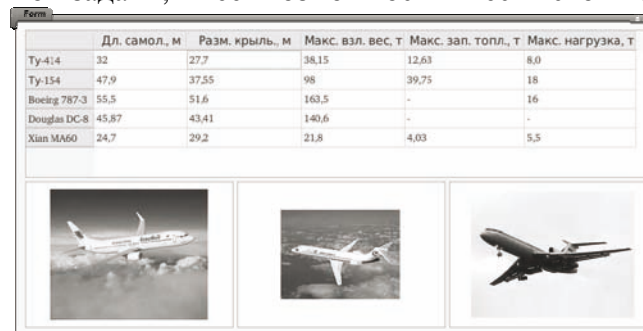


Рисунок 9 – Экран прототипов

Первый экран - экран, на котором идентифицируется проектант, дублируется в текстовом виде диалог робота и проектанта, а также в иерархическом виде представлен сценарий проектирования в виде перечня решаемых последовательно задач (см. рисунок 8). На этом экране отображается информация из технического задания на проектирование самолета, данный экран является стартовым и с него осуществляется управление всем интерфейсом, также при необходимости на нем выбирается сценарий общения пользователя с роботом-проектантом.



Рисунок 10 – Экран принятия решения

На рисунке 11 представлен экран выбора комплектующих на примере выбора двигателя. Для самолета на этапе предварительного проектирования, как правило, осуществляется выбор двигателя, колес шасси, воздушного винта, если схема самолета предполагает его наличие, и т.п.. Узлы и агрегаты выбираются на основании анализа их технических и экономических характеристик, производственных и организационных возможностей. Данная задача может решаться в автоматическом режиме, но если пользователь на основании личных соображений хочет внести коррективы в этот процесс, ему предоставляется такая возможность.

Одним из ключевых экранов является экран демонстрации 3D модели (рисунок 12). В за-

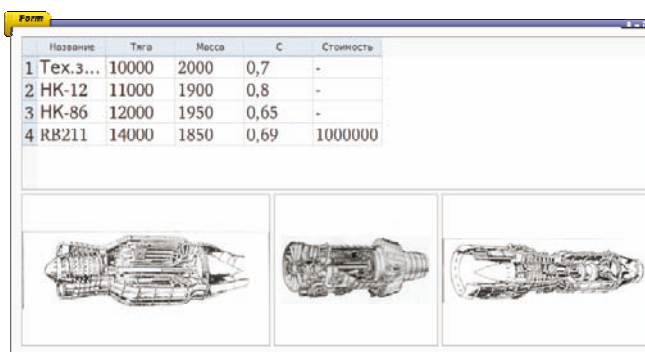


Рисунок 11 – Экран выбора комплектующих

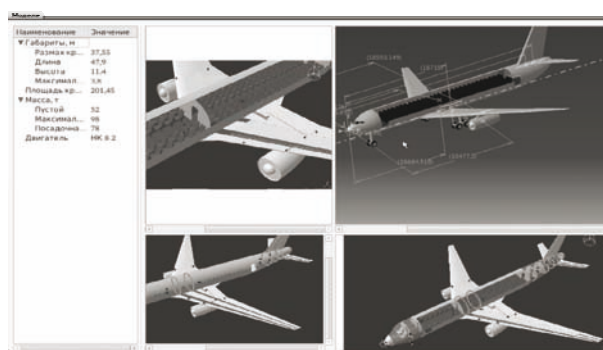


Рисунок 12 – Экран представления 3D модели

висимости от необходимости он может занимать несколько физических экранов для большего удобства восприятия. На нем происходит отображение в различных вариантах трехмерной геометрической модели самолета, полученной в автоматическом режиме по результатам проектировочного расчета.

Для повышения удобства работы пользователя возможно представление 3D модели одновременно на всех экранах. В этом случае значительно повышается наглядность представления за счет более высокого разрешения экрана при большой диагонали монитора (рисунок 13).



Рисунок 13 – Представление модели крыла самолета на нескольких экранах

Помимо общего вида самолета РП определяет конструктивно-силовую схему и автоматически проводит центровку самолета (рисунок 14).

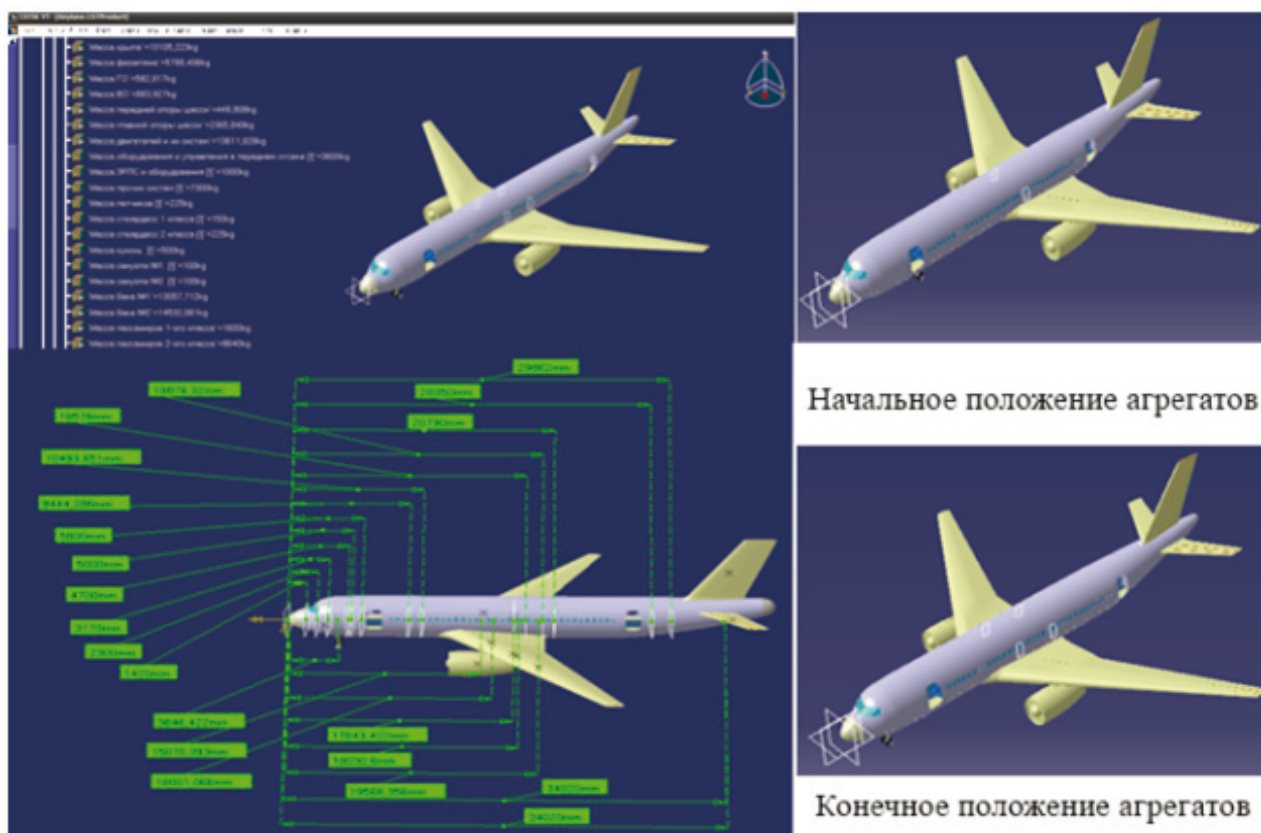


Рисунок 14 – Экран центровки самолета

3.4 Сценарии расчета

Задача аналитического проектирования самолета требует построения математической модели изделия, которая характеризуется **совокупностью внешних параметров** (требования технического задания на проект самолета: масса и другие параметры полезной нагрузки; потребная дальность полета; крейсерская скорость; класс аэродрома базирования и, соответственно, длина и ширина взлетно-посадочной полосы, её характеристики; категория и параметры системы автоматической посадки на аэродроме базирования и т. д.); и **совокупностью внутренних параметров** (параметры самолета, определяемые в процессе решения задачи: прежде всего, взлетная масса, удельная нагрузка на крыло, стартовая тяговооруженность, аэродинамические характеристики, размеры самолета и его агрегатов, состав и параметры систем и т. д.), а так же **целевой функцией** (критерием или критериями эффективности), позволяющей выбрать среди альтернативных проектов лучший, обеспечивающий экстремальное значение целевой функции.

Робот-проектант в силу программно – аппаратных ограничений пока не способен самостоятельно синтезировать принципиально разные варианты конструктивно-силовой схемы, поэтому система использует те варианты конструкции, которые предварительно были в ней описаны.

РП позволяет провести анализ ряда вариантов схем и компоновок пассажирского самолета и, самостоятельно или, если требуется, на основе диалога с проектантом, выбрать вариант, наиболее полно отвечающий техническим требованиям заказчика. Робот-проектант имеет модульную схему – отдельные подзадачи (например, определение удлинения крыла или его массы) решаются отдельными подпрограммами, выполнение которых инициируется роботом по заданной логике.

Совокупность используемых в решении конкретной задачи расчетных модулей формирует сценарий расчета. Он зависит от типа решаемой задачи, степени вовлеченности человека в процесс работы робота-проектанта, а так же от выбранного метода расчета.

Решение задачи предварительного проектирования самолета требует создания его математической и геометрической моделей. Модели строятся на основе обработки исходных данных технического задания на проектирование по сформированному сценарию расчета. Непосредственное вычисление параметров будущего самолета производится отдельными расчетными модулями, которые получают необходимую информацию из матрицы проекта и возвращают в нее результат своей работы. Выполнение конкретного модуля инициируется при условии достаточности входных данных для этого модуля, при этом входом одних модулей может являться выход других. Выполнение независимых модулей может идти параллельно. Модульная структура вычислительной подсистемы позволяет реализовать возможность выбора среди нескольких методов расчета, а так же при необходимости комбинировать их.

3.5 Блок связи с CAD системой и 3D модель

База данных робота-проектанта содержит в себе статистическую информацию, в данном случае о самолетах. На основе этой информации система строит тренды, что позволяет корректно подбирать значения недоопределенных параметров в автоматическом режиме на основе статистики. Помимо статистической информации база данных робота-проектанта включает в себя каталоги некоторых деталей и агрегатов, а так же необходимую для расчетов справочную информацию, например, параметры международной стандартной атмосферы, параметры аэродинамических профилей и пр.

По данным, взятым из технического задания, явно определенным пользователем и, если необходимо, определенным автоматически, робот-проектант вычисляет основные характеристики будущего самолета и производит весовой расчет в первом приближении. Далее, в зависимости от типа силовой установки вычисляется потребная тяго- или энерговооруженность, при этом робот-проектант исходя из заложенных правил «самостоятельно» выбирает максимальное потребное значение с учетом коэффициента запаса.

Производится расчет массы конструкции второго приближения. «Прорабатывается» топливная система, осуществляется «выбор» силовой установки по потребной тяговооруженности, вычисляется масса оборудования и т.п.. На основе перечисленных параметров рассчитывается взлетная масса во втором приближении; далее она сравнивается с взлетной массой, полученной на предыдущем этапе расчета, и, если разница между ними значительная, происходит повторное вычисление массы второго приближения на основе изменившихся данных. В противном случае система продолжает дальнейший расчет характеристик самолета: определяется потребный объем топлива и, соответственно, объем топливных баков и т.п.

Следующим этапом является подетальный расчет массы всех агрегатов. По его завершению робот-проектант осуществляет центровку самолета (рисунок 14) на основе данных проведенного весового расчета.

Определение параметров крыла, выбор его механизации и органов управления начинается с выбора аэродинамического профиля, который осуществляется РП в созданном каталоге

профилей, содержащем координаты поверхностей профилей в относительных величинах для крыла и оперения.

Параллельно с крылом осуществляется расчет фюзеляжа и силовой установки. По завершению расчета компонентов производится аэродинамический расчет самолета в целом, расчет его топливной и предварительный расчет экономической эффективности.

На основании данных, полученных при расчете агрегатов, робот-конструктор строит параметризованную трехмерную модель самолета в системе CATIA.

В РП параметризованная 3D модель самолёта была создана в системе CATIA V5 R19, являющейся современной САПР с последовательной объектно-ориентированной архитектурой. Набор имеющихся в ней инструментов, арсенал которых включает возможность формулировки правил взаимосвязи параметров, проверку накладываемых условий проектирования и создание аналитических зависимостей для автоматической реализации функций проектирования, позволяет создавать сложные параметрические модели объектов, в том числе, частей самолёта в виде шаблонов (рисунок 15).



Рисунок 15 – Параметризованный каркас горизонтального оперения¹

Шаблон в понятиях CATIA представляет собой структуру построений, определяемую проектировщиком, геометрические параметры которой зависят от накладываемых условий, правил и ограничений. При использовании шаблонов проектировщику требуется лишь ввести исходные данные, и на их основе строятся элементы или целые конструкции по заложенным в них алгоритмам, генерируя результат, который можно использовать в дальнейшем проектировании. Шаблоны дают возможность однажды созданные алгоритмы применять повторно к другим построениям, получая при этом новый результат.

В представленной работе в качестве инструмента автоматизации использовались шаблоны типа UDF (User-Defined Feature), которые представляют собой особый вид примитивов САПР CATIA, внутри которых может находиться любое количество деревьев построения, связанных с любым количеством средств автоматизации CATIA. Например, это могут быть несколько наборов данных с формулами, правилами и реакциями на события, которые в UDF будут представлены одним элементом и несколькими примитивами вывода результатов работы шаблона со своими деревьями параметров и персональными диалоговыми окнами.

¹ Расположение нервюр рулевой поверхности и неподвижной части агрегата не согласовано в представленной на рисунке модели РП (Прим. рецензента)

Модель состоит из макропримитивов, разбивка на которые осуществляется поагрегатно – крыло, фюзеляж, оперение и т.п. При этом каждый макропримитив состоит из нескольких частей, например, фюзеляж строится из трех компонентов – носовой части, цилиндрической части и хвостовой части, каждая из которых имеет собственные размерные характеристики.

Наряду с аэродинамической и весовой компоновкой, конструктивно-силовой схемой, важной является также модель компоновки внутреннего пространства. Многовариантность размещения пассажирских кресел, служебно-бытовых помещений и т. п. делает задачу их компоновки достаточно трудоемкой. Геометрия пассажирской кабины самолета в значительной степени определяет его размеры и, следовательно, аэродинамические, массовые и экономические характеристики. Диаметр фюзеляжа выбирается из условия получения минимального миделева сечения при выполнении компоновочных требований.

На рисунке 16 представлен вариант компоновки пассажирского салона, полученный в автоматическом режиме. РП автоматически определяет оптимальное количество кресел в ряду, исходя из размеров фюзеляжа и заданного класса салона. В случае необходимости робот может решить обратную задачу – по заданному количеству мест в ряду подобрать минимальное сечение фюзеляжа, при этом автоматически происходит перерасчет изменившихся характеристик и перестраивается 3D модель. Это важно в силу того, что процесс выбора компоновки пассажирского салона, как и большинство процессов предварительного проектирования самолета, является итерационным, и возможность в реальном времени отслеживать последствия вносимых в компоновку изменений значительно повышает эффективность процесса [23].

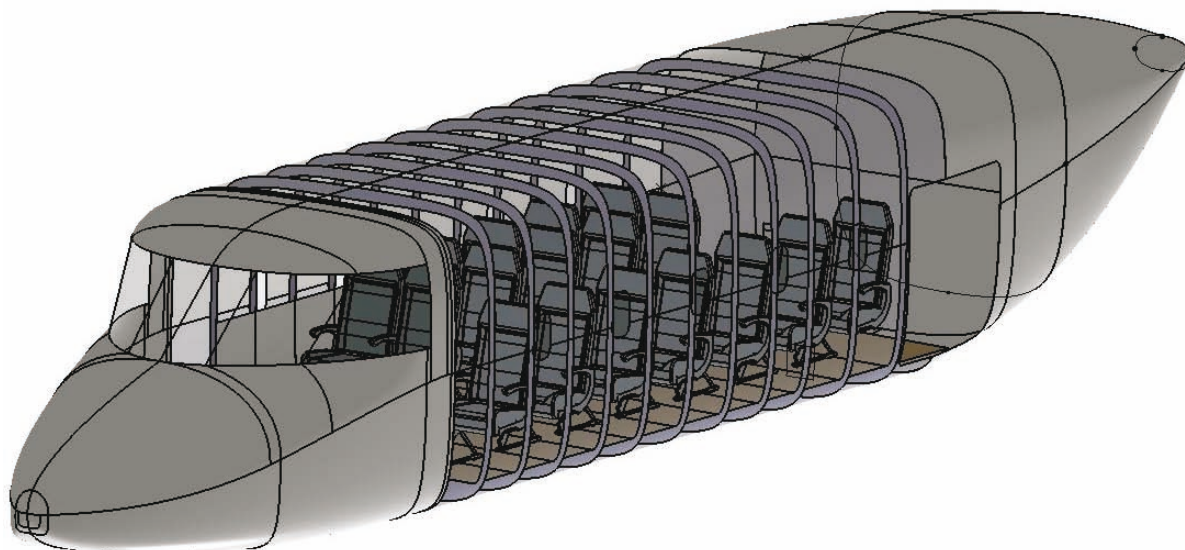


Рисунок 16 – Пример компоновки пассажирского салона регионального самолета

Крыло самолета строится по четырем сечениям (центральному, первому промежуточному, второму промежуточному и концевому), взятым из базы данных робота-проектанта, при этом из относительных координат профиль пересчитывается в абсолютные под конкретное значение длины хорды проектируемого самолета в нужном сечении. Затем по построенным сечениям строятся плоскости, ограничивающие геометрическое место крыла на основе параметризованной проволочной геометрии (рисунок 17).

По завершению построения внешних обводов крыла запускается расчет конструктивно-силовой схемы. Положение и количество лонжеронов задается пользователем или берется из статистики, из базы знаний или прототипа. Далее происходит вычисление потребного количества и положения нервюры. Нервюры представляет собой параметризованный шаблон, который после задания ему положения узловых точек принимает нужную форму и размер (рису-

нок 18). Законченная модель крыла передается как макропримитив для построения модели самолета в целом. После доопределения необходимых параметров каркас элементов приобретает законченный вид (рисунок 19). При необходимости элементы такого каркаса могут быть переданы в САЕ систему с целью их последующего конечно-элементного расчета (рисунок 20). При необходимости, отдельные элементы могут заменяться на более детализированные, что обеспечивает гибкость модели и широкие возможности, а так же удобство её применения.

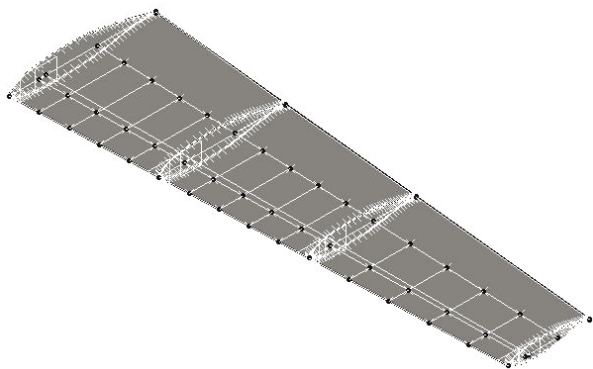


Рисунок 17 – Построение внешней поверхности крыла

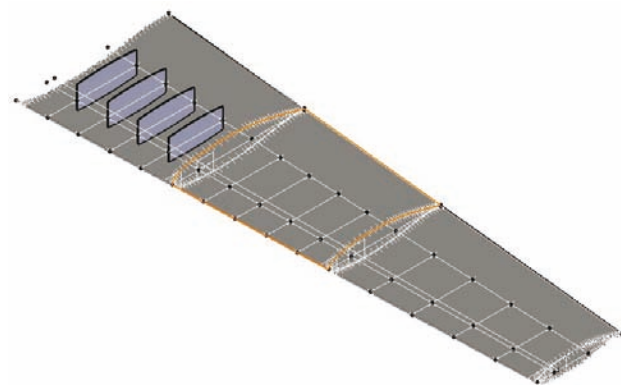


Рисунок 18 – Построение силового каркаса

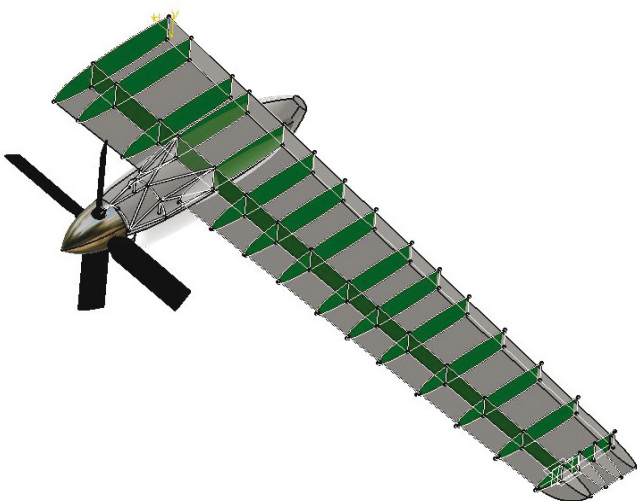


Рисунок 19 – Пример компоновки пассажирского салона

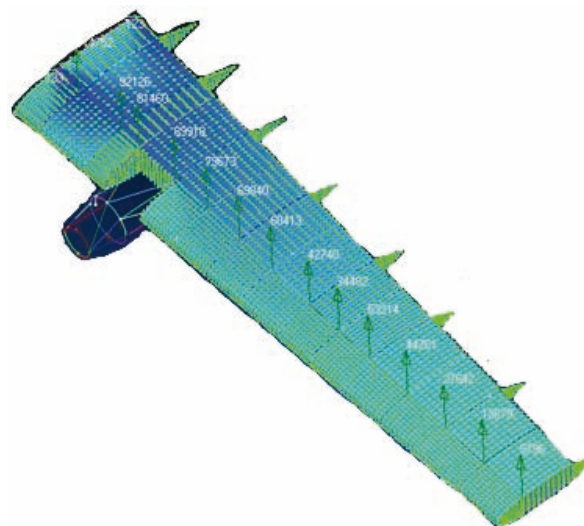


Рисунок 20 – Расчет силового каркаса

Аналогичным образом происходит построение моделей шасси, моторамы, двигателей, оперения и фюзеляжа.

Готовая модель (рисунки 21, 22) может быть использована в качестве основы для последующего конечно-элементного расчета, автоматического формирования чертежей, а также для проведения аэродинамических исследований, как в САЕ-системах, так и для физических экспериментов на модели, полученной на 3-D принтере. Модели, автоматически сгенерированные в САД системе, пригодны для дальнейшего использования без дополнительной обработки, что сокращает время, необходимое для адаптации САД моделей для САЕ систем. В случае необходимости неоднократного расчета типовых элементов можно использовать структурированную конечно-элементную сетку, автоматически меняющуюся при изменении геометрии рассчитываемой детали, что позволит дополнительно повысить эффективность работы системы.

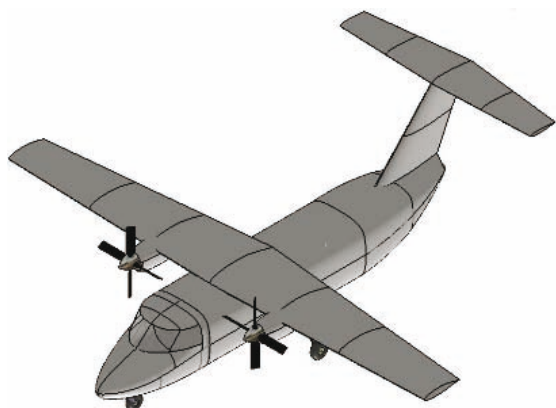


Рисунок 21 – 3D модель самолета

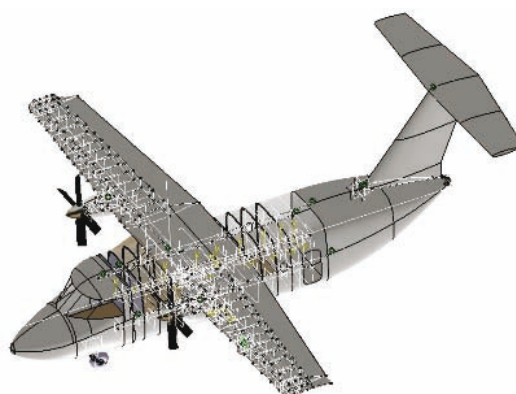


Рисунок 22 – Структура 3D модели самолета

При необходимости элементы структуры агрегатов могут заменяться на более детализированные. Примером такой декомпозиции является построение подборки отъемной части крыла (рисунки 23-26).

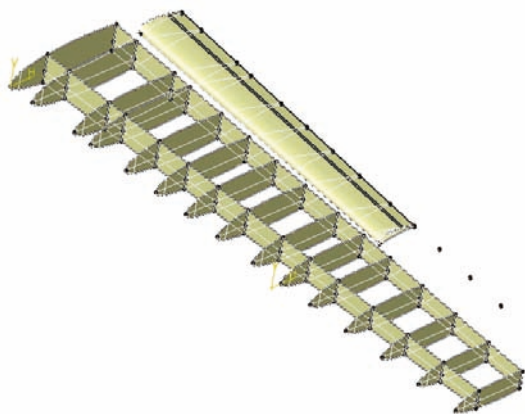


Рисунок 23 – Каркас и закрылок

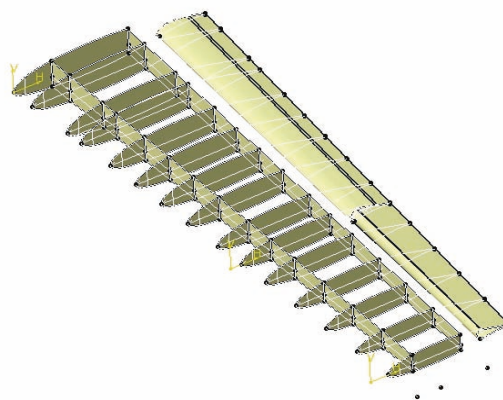


Рисунок 24 – Каркас с закрылком и элероном

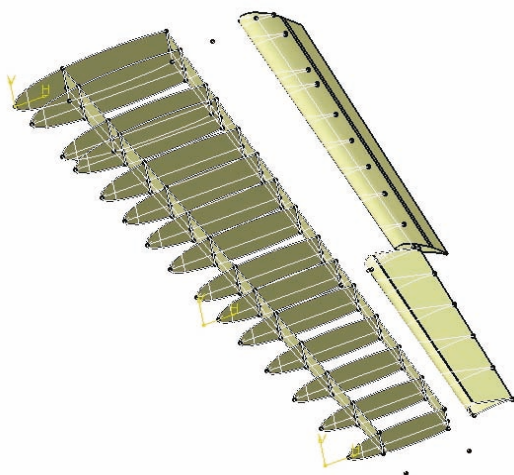


Рисунок 25 – Каркас с закрылком и элероном, закрылок выпущен

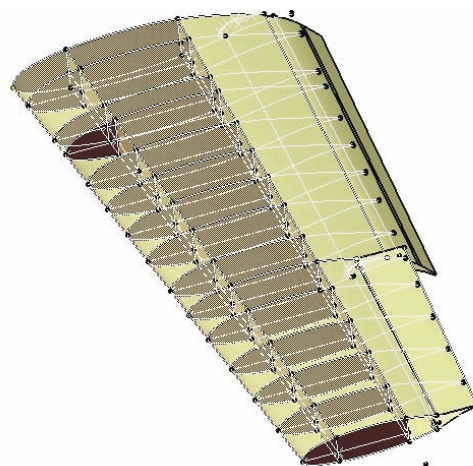


Рисунок 26 – Подборка крыла, закрылок выпущен, элерон отклонен

Логика построения модели максимально вынесена за её пределы – это позволяет использовать более простые модели и упрощает увязку макропримитивов, одновременно упрощая систему в целом и увеличивая её эффективность путем повышения её расширяемости. Удобнее выполнить несколько отдельных моделей, например для Т-образного и классического оперения, и затем выбирать модель, необходимую для конкретного случая, чем создавать более сложную интегральную модель, которая будет медленнее работать и требовать большего количества времени на ее создание.

В модели остаются только те вычисления, которые сложно или слишком затратно выполнять за её пределами, например, определение размеров каждой нервюры проще выполнить в условиях наличия ограничивающих её элементов, чем рассчитать их положение отдельным аналитическим модулем.

Важным свойством модели является её непрерывная связанность с базой данных РП. Практически это выражается в том, что любое изменение проектных переменных находит адекватное отражение в модели в режиме реального времени, что позволяет наглядно представлять зависимости между характеристиками самолета и, в случае необходимости, оперативно вносить коррективы в процесс расчета на любом его этапе.

3.6 Поддержка испытаний на физических моделях

Как правило, РП создается на базе серийных устройств вычислительной техники (процессоров, запоминающих устройств, дисплеев и т.п.). Однако в РП может применяться и специальная аппаратура для расширения возможностей ЭВМ. Так, для робототехнических исследований необходимым является наличие оборудования, позволяющего проводить эксперименты в автоматическом режиме [12, 13].

Для РП в области предварительного проектирования самолета дополнительным специальным оборудованием может являться программно - аппаратный комплекс для физических аэродинамических испытаний масштабной модели самолета, состоящий из 3D принтера, программного комплекса, осуществляющего перевод модели в вид, пригодный для объемной печати, аэродинамической трубы и средств доставки модели из принтера в трубу. На основе модели, построенной в автоматическом режиме, с помощью 3D плоттера была изготовлена твердотельная копия для испытаний в аэродинамической трубе (рисунок 27). Результаты, полученные при продувке (рисунки 28-30), можно сравнить с результатом аэродинамического расчета в программе конечно-элементного анализа. Доступный уровень технологий пока не позволяет полностью автоматизировать весь процесс, но количество неавтоматизированных действий сведено к минимуму.



Рисунок 27 – Твердотельная копия модели самолета

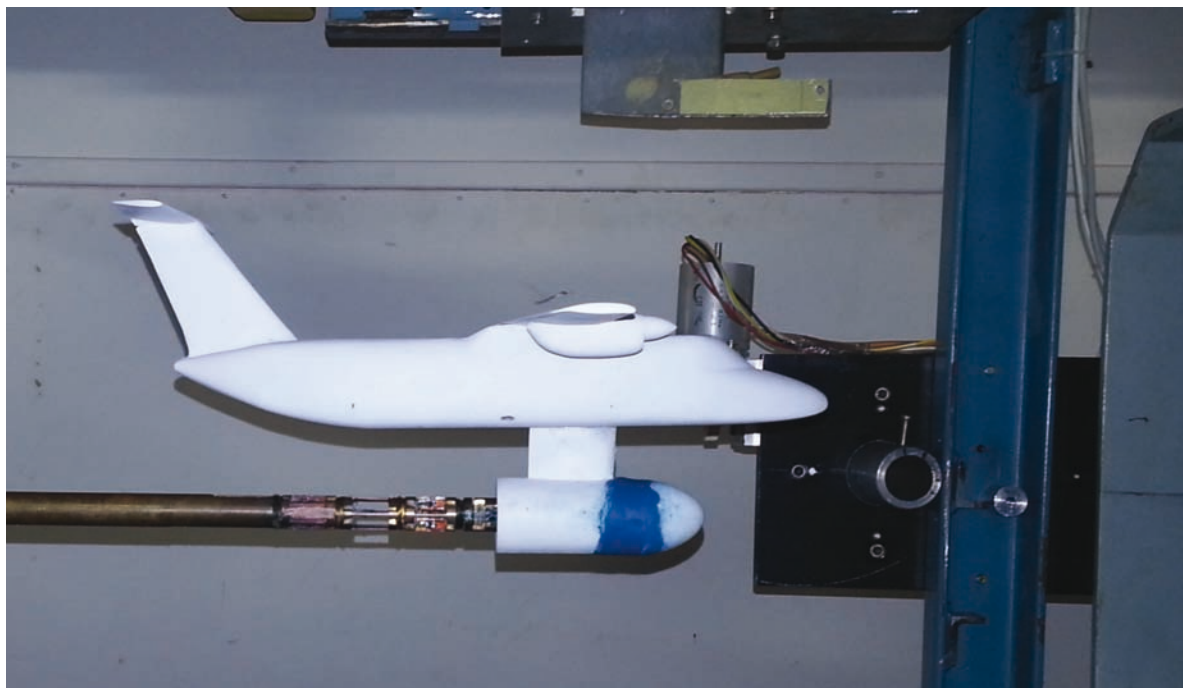


Рисунок 28 – Твердотельная копия модели при испытаниях в аэродинамической трубе

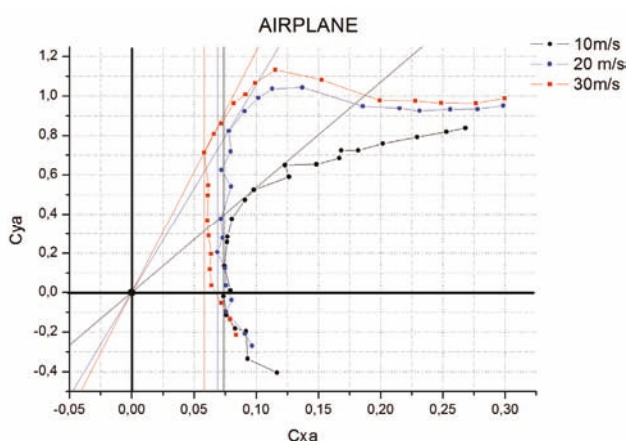


Рисунок 29 – Поляра самолета (без шасси)

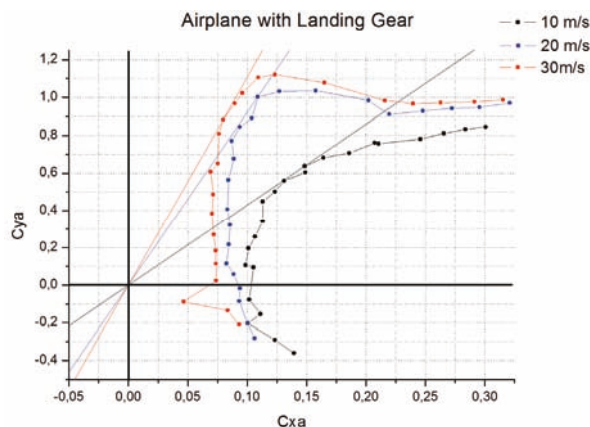


Рисунок 30 – Поляра самолета (с шасси)

4 Заключение

Результаты, полученные при создании прототипа робота-проектанта в области предварительного проектирования самолета, демонстрируют реализуемость интеллектуальных помощников в области конструирования сложных технических артефактов. Представленный прототип позволяет пользователю, не знакомому с САД-системами, успешно создавать трехмерные модели самолета и его агрегатов, а так же их различные представления, в автоматическом режиме осуществляя комплекс действий, которым обычно занимается конструктор, за счет формализации его поведения на основе онтологического анализа. Полученный результат позволяет надеяться на активное использование в будущем роботов-проектантов как интеллектуальных помощников в реальной практике проектирования.

5 Благодарности

Считаем своим долгом выразить признательность за поддержку и содействие в работе над роботом-проектантом самолета профессорам Комарову В.А., Козлову Д.М., Шахову В.Г., доценту Королькову О.Н. и многим другим преподавателям и сотрудникам кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов СГАУ.

Список источников

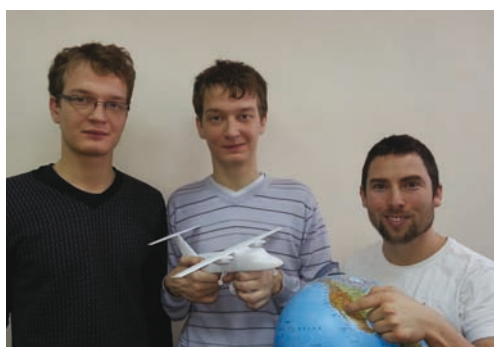
- [1] Ракитов А.И. Философия компьютерной революции. – М.: Политиздат, 1991 - 240 с.
- [2] Lindsay R, Buchanan B, Feigenbaum E, Lederberg J. DENDRAL: A Case Study of the First Expert System for Scientific Hypothesis Formation. *Artificial Intelligence*. 1993;61(2):209–261. doi: 10.1016/0004-3702(93)90068-M.
- [3] Lenat DB, Brown JS. Why AM and EURISKO appear to work. *Artificial Intelligence*. 1984;23(3):269–294. doi: 10.1016/0004-3702(84)90016-X.
- [4] Kulkarni D, Simon H. The processes of scientific discovery: The strategy of experimentation. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*. 1988;12(2):139–175. doi: 10.1207/s15516709cog1202_1.
- [5] Langley P, Simon H. *Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes*. The MIT press; 1987.
- [6] Falkenhainer B, Michalski R. Integrating quantitative and qualitative discovery: the ABACUS system. *Machine Learning*. 1986;1(4):367–401
- [7] Zytow J. Automated discovery of empirical laws. *Fundamenta Informaticae*. 1996;27(2-3):299–318.
- [8] Nordhausen B, Langley P. *Proceedings of the seventh international conference (1990) on Machine learning*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA, USA; 1990. A robust approach to numeric discovery; pp. 411–418.
- [9] Distilling free-form natural laws from experimental data. Schmidt M, Lipson H. *Science*. 2009 Apr 3.
- [10] 2020 computing: a two-way street to science's future. Foster I *Nature*. 2006 Mar 23; 440(7083):419.
- [11] Michalski R, Watanabe L. Tech. rep., Tech. Rep. No. MLI-Report 88-1. Fairfax, VA: George Mason University, Artificial Intelligence Center; 1988. *Constructive Closed-Loop Learning: Introductory Ideas and Examples*.
- [12] King RD, Rowland J, Oliver SG, Young M, Aubrey W, Byrne E, Liakata M, Markham M, Pir P, Soldatova LN, Sparkes A, Whelan KE, Clare A. *Science*. 2009 Apr 3; 324(5923):85-9.
- [13] An ontology for a Robot Scientist. Soldatova LN, Clare A, Sparkes A, King RD *Bioinformatics*. 2006 Jul 15.
- [14] Knowledge-guided inference for voice-enabled CAD. X.Y. Kou, S.K. Xue, S.T. Tan *Computer-Aided Design Volume 42, Issue 6, June 2010, Pages 545-557*.
- [15] http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_project.php?id=1102, актуально на 17.01.2013
- [16] <http://edainc.net/Videos.aspx?Play=Conveyor>, актуально на 17.01.2013
- [17] http://www.jtbworld.com/autocad_automation_tools.htm, актуально на 17.01.2013
- [18] <http://www.itcinfotech.com/Engineering-Services/Design-Automation.aspx>, актуально на 17.01.2013
- [19] Боргест, Н.М. Модель интеллектуального интерфейса робота «конструктор самолета» / Н.М. Боргест // XI международная научная конференция имени Т.А. Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2011», Киев, Просвіта, 2011, с. 297-302.
- [20] Боргест Н.М., Гиматдинова С.Р., Шустова Д.В., Иерархические и ассоциативные связи между терминами в тезаурусе на примере словаря проектанта, *Вестник СГАУ, №3, 2012*
- [21] Боргест Н.М., Шустова Д.В., Одинцова С.А., Князихина Ю.Е., Подход к решению проблемы синонимов в тезаурусе интеллектуального помощника проектанта// *Материалы международной научно-технической конференции OSTIS-2013, Минск, БГУИР, 2013*
- [22] Боргест Н.М., Чернов Р.В., Шустова Д.В., Разработка интерфейса интеллектуального помощника проектанта// *Материалы международной научно-технической конференции OSTIS-2012, Минск, БГУИР, 2012*
- [23] Боргест Н.М., Алеев Р.Х., Аксаян П. А., Громов А.А., Автоматизированное формирование 3D модели самолета на этапе технических предложений. *Вестник СГАУ. №6, 2012*
- [24] Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К., Проектирование самолетов: Учебник для вузов — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2005. — 616 с.
- [25] Боргест Н.М. Анализ и синтез данных при проектировании, / Н.М. Боргест // XII международная научная конференция имени Т.А. Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2012», Киев, Просвіта, 2012, с. 161-166.
- [26] <http://nlpseminar.ru/ainl/program/igor-gvozdikin/>, актуально на 20.01.2013

Сведения об авторах



Боргест Николай Михайлович, 1954 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт им. С.П. Королёва в 1978 г., к.т.н. (1985). Профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета (национальный исследовательский университет). Член Международной ассоциации по онтологиям и их приложениям (IAOA). В списке научных трудов около 100 работ в области автоматизации проектирования.

Nikolay Mikhailovich Borgest (b.1954) graduated from the Korolyov aerospace Institute (Kuibyshev-city) in 1978, PhD (1985). He is Professor at Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (Department of construction and design of aircraft SSAU). He is an International Association for Ontology and its Applications member. He is co-author of about 100 scientific articles and abstracts in the field of CAD and AI.



Громовы Андрей Александрович и Алексей Александрович - студенты и **Хорхе Морено Рочин** (Мексика) - магистрант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Области научных интересов Громовых: САПР, проектирование самолета; Хорхе Морено: аэродинамика.

Gromov Andrey Aleksandrovich and Gromov Alexey Aleksandrovich & Jorge Moreno (Mexico) are students of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Gromov's area of scientific interests: CAD, aircraft design, Jorge Moreno's area: aerodynamics.

Gromov's area of scientific interests: CAD, aircraft design, Jorge Moreno's area: aerodynamics.

Коровин Максим Дмитриевич, студент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Области научных интересов: САПР, CALS технологии.

Korovin Maxim Dmitrievich, the student of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of scientific interests: CAD, CALS.



Шустова Дина Владимировна, аспирантка кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов СГАУ. Область научных интересов: онтология проектирования.

Shustova Dina Vladimirovna, post-graduate student of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). Area of scientific interests: ontology of designing.

Одинцова Светлана Александровна и Князихина Юлия Евгеньевна, студентки Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Области научных интересов: САПР, CALS технологии.

Odintsova Svetlana Alexandrovna & Knyazikhina Julia Evgenievna, are students of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of scientific interests: CAD, CALS.