

Направления интеллектуализации САПР в машиностроении

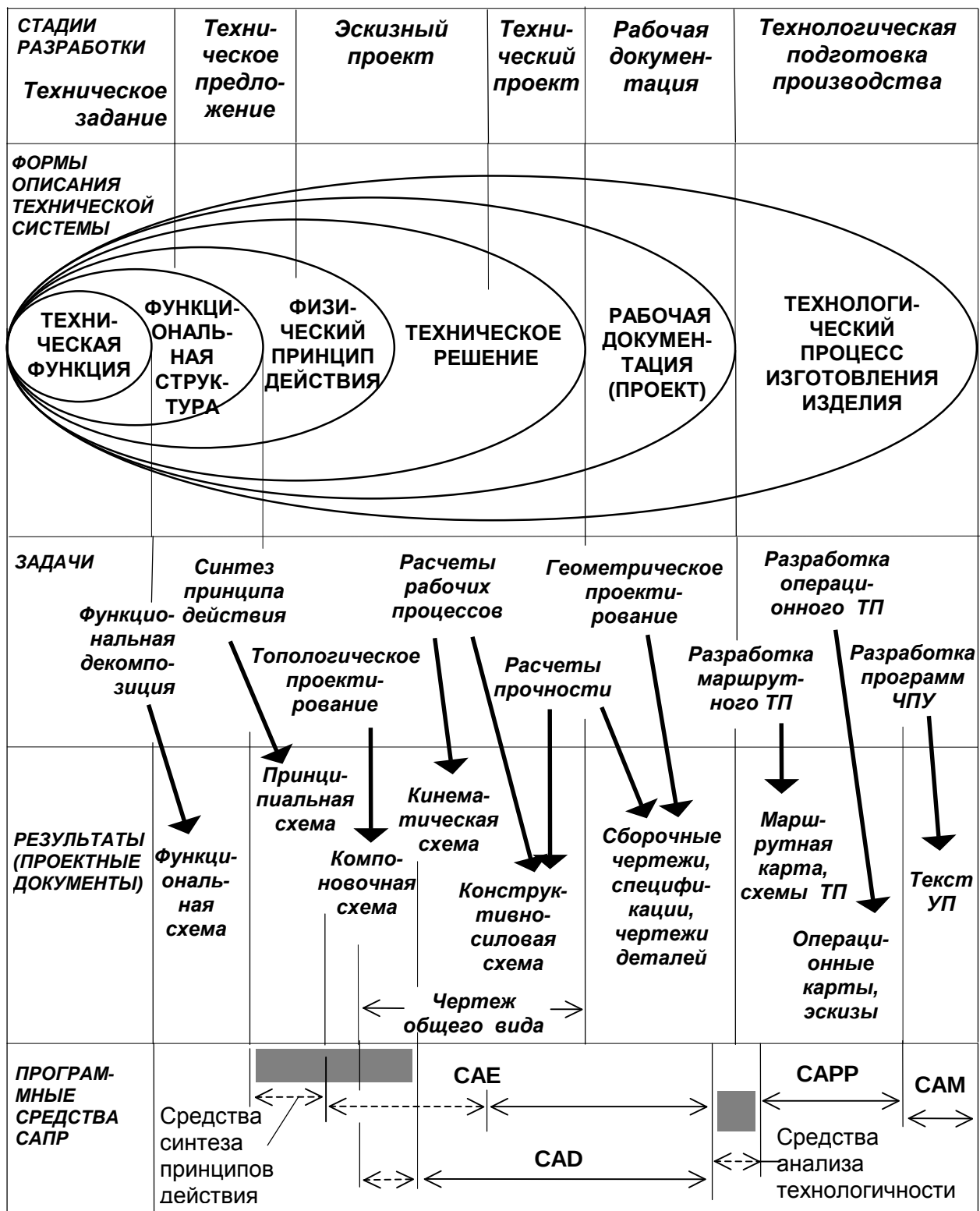
*Институт машин и систем Минпромполитики и НАН Украины,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"*

Анализ возможностей и опыта применения отечественных и зарубежных систем автоматизированного проектирования свидетельствует о неравномерном и нерациональном распределении основных возможностей систем между отдельными фазами разработки объектов новой техники. В наибольшей степени автоматизированы наиболее трудоемкие, но наименее «интеллектуально насыщенные» стадии работ, такие, как геометрическое моделирование, оформление конструкторской документации, различного рода расчеты (преимущественно поверочные), некоторые задачи проектирования технологических процессов и подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ.

Если на схему соотношения форм описания технической системы, введенную в работе [1], наложить перечень стадий разработки, задач проектирования, форм документального представления проектных решений, можно представить процесс разработки новой техники в виде общей последовательности выполнения проектных работ и создания проектных документов (рис. 1). Несмотря на наличие определенных особенностей в каждой из отраслей промышленности, полученную схему можно считать достаточно универсальной. Выделив на схеме области применения программных средств САПР, легко убедиться в существенной неравномерности обеспечения различных задач средствами автоматизации.

Вне сферы действия САПР оказываются важнейшие задачи начальных стадий разработки, относящиеся к группе задач структурного синтеза, а именно синтез функциональных структур, физических принципов действия изделий, конструктивных схем. Как отмечено в работе [2], уровень использования традиционных САПР, ядром которых является система геометрического моделирования, на различных этапах проектирования обратно пропорционален влиянию этих этапов на технико-экономические показатели объекта разработки. При формировании функциональных и принципиальных схем геометрическое моделирование не используется, поэтому CAE/CAD/CAM-системы не способны помочь инженеру на начальных этапах его работы. Кроме того, программные средства функционального проектирования ориентированы преимущественно на решение прямых задач (задач анализа), в то время как на начальных этапах разработки преобладают обратные задачи (задачи синтеза).

Вследствие этого начальные этапы разработки, хотя и являются наиболее ответственными, остаются либо вовсе не охваченными средствами автоматизации, либо требуют создания специального программного обеспечения собственными силами или на заказ.



– частично автоматизированные функции и задачи;

– функции и задачи, реализованные в отдельных системах

Рисунок 1 – Области применения программных средств САПР в процессе проектирования новой техники

Отдельные примеры успешного решения задач синтеза функциональных структур и принципиальных схем объектов новой техники не ведут к изменению общего положения. Приходится признать, что, хотя теоретические основы проектирования технических систем сформулированы уже давно, однако до их практического использования в САПР дело так и не дошло. Сквозное (от замысла до технологической подготовки производства) проектирование на основе единой модели объекта до сих пор остается заветной мечтой. Почему?

По мнению авторов, основными причинами такого положения являются:

1. Ограниченные возможности геометрических моделей как основного средства хранения и передачи проектных данных. И конструктор при проектировании изделия, и технолог при проектировании процесса его изготовления оперируют не столько геометрическими, сколько функциональными элементами, хотя и различными.

Для конструктора важны функционально-конструктивные элементы, выполняющие те или иные функции в изделии (фиксация шестерни на валу, передача вращающего момента и т.п.). Для технолога важны конструктивно-технологические элементы (ступень вала, фаска, шпоночный паз и т.п.), которым можно поставить в соответствие элементы технологического процесса (технологические операции или переходы) и технологические ресурсы (оборудование и инструменты).

Состав геометрических примитивов большинства CAD-систем не совпадает с перечнем ни функциональных элементов деталей, ни конструктивно-технологических элементов. Поэтому чисто геометрический подход не соответствует методике работы ни одного, ни другого специалиста.

2. Ограниченные возможности в представлении проектных альтернатив. Отмеченные выше ограничения систем геометрического моделирования усугубляются особенностями современных систем управления проектными данными (PDM, Project / Product Data Management). Главная из них – сложность представления множества проектных альтернатив. Большинство современных PDM-систем поддерживают работу со структурной моделью изделия, включая построение дерева состава изделия, формирование перечня свойств объектов и др., но не содержат штатных средств для представления альтернативных вариантов проектных решений. По этой причине формирование полноценной обобщенной модели (метамоделю) некоторого класса изделий в форме И-ИЛИ-графа крайне сложно, а то и вовсе невозможно. Между тем именно такая модель признана наиболее рациональной для реализации проектных процедур структурного синтеза [3]. Реализованные в отдельных системах новые возможности управления конфигурацией изделия, в частности возможности работы с вариантами конструктивных исполнений, – пока еще исключение, а не правило.

3. Ограниченные возможности многоаспектного описания объектов проектирования. Еще одно ограничение систем PDM в машиностроительных САПР – невозможность создания и ведения многоаспектного описания объекта проектирования, т.е. взаимосвязанных описаний функционального, процессного («физического»), конструктивного и других аспектов. Даже форматы для представления этих описаний еще не разработаны

(прикладной протокол AP233 комплекса стандартов STEP для функциональных моделей пребывает пока в начальной стадии разработки).

Штатными средствами поддерживается преимущественно конструктивное описание, что также не способствует реализации идеи сквозного проектирования. Заметим, что в других отраслях (САПР электроники, САПР объектов строительства) уже предприняты шаги к созданию единых (многоаспектных) информационных моделей объектов.

4. Недооценка роли специализированных программных средств САПР. Эффективность системы проектирования объектов определенного класса (самолетов, автомобилей, станков и др.) определяется не столько универсальными компонентами САПР (системами геометрического моделирования, конечно-элементного анализа и др.), сколько специализированными программными средствами (объектно-ориентированными подсистемами). Для самолета это подсистемы расчета аэродинамических и летно-технических характеристик, для авиадвигателя – подсистемы газодинамических расчетов и т.д. САПР конкретного объекта должна воплощать специфические именно для этого объекта модели, методы проектирования и правила принятия решений.

Обилие представленных на рынке готовых программных средств CAE/CAD/CAM порождает иллюзию возможности решения всех задач проектирования с помощью только покупного программного обеспечения. Такая переоценка роли универсальных компонент и недооценка специализированных средств часто приводит к неэффективным решениям. САПР отличается от набора универсальных модулей CAE/CAD/CAM прежде всего четким определением объекта проектирования – не бывает систем проектирования «чего угодно».

Кроме того, в различных конструкторских бюро методики проектирования даже одинаковых объектов могут существенно различаться. Поэтому система проектирования конкретных технических объектов должна не просто иметь в своем составе специализированные объектно-ориентированные модули их проектирования, но и воплощать методы проектирования этих объектов, характерные именно для данного КБ. В работе [2] такое требование названо принципом индивидуализации САПР. Отсюда следует, что каждое КБ нуждается в разработке специализированных модулей САПР, взаимодействующих с универсальными программными средствами CAE/CAD/CAM.

5. Низкая производительность традиционных технологий разработки программного обеспечения САПР. Для создания специализированных подсистем САПР разработчики CAE/CAD/CAM-систем предусматривают возможность подключения внешних программ и другие средства. Однако большинство из предлагаемых инструментов требуют трудоемкого написания программ.

Основными препятствиями в самостоятельной разработке специализированных подсистем собственными силами каждого предприятия или КБ являются следующие:

а) отсутствуют специалисты, владеющие одновременно знаниями предметной области и навыками профессионального программирования;

б) существующие методики разработки систем и технологии программирования ориентированы преимущественно на последовательное

выполнение основных стадий и на разработку проекта системы «с нуля», что существенно увеличивает сроки создания и стоимость специального ПО САПР по причине его ограниченной тиражируемости;

в) производительность программирования на языках высокого уровня не превышает 50 операторов программы в смену; при таких темпах разработки длительность создания системы может стать соизмеримой с периодом ее морального старения.

По уровню автоматизации программирования к инструментам класса CASE (Computer-Aided Software Engineering) можно отнести лишь аппарат макроопределений. Как показано в работе [2], практически единственным способом разрешения этого противоречия может служить оснащение САПР инструментальными средствами расширения функций, позволяющими непрограммирующему профессионалу пополнять систему новыми методами проектирования.

6. Недостаточный уровень формализации методик проектирования. Дополнительным препятствием к самостоятельной разработке специализированных подсистем служит то обстоятельство, что методику проектирования конкретных объектов (по крайней мере, на стадии разработки САПР) не всегда можно выразить в виде алгоритма.

Как отмечено в работе [4], «программы САПР материализуют строго определенный детерминированный алгоритм, которому нужно следовать, чтобы получить решение. Но инженер работает так не всегда; его устремления к решению более расплывчаты. Он эвристически использует весь ранее накопленный опыт, а алгоритмическое приближение к приемлемому решению – всего лишь точное воспроизведение пути его принятия. Такой метод не может быть воспроизведен классическими программами САПР».

Поэтому САПР должна предусматривать возможность решения задач с заранее неизвестным алгоритмом, причем сформулированных в терминах предметной области. Такие задачи традиционно относятся к числу интеллектуальных, в связи с чем в работе [2] это требование сформулировано как принцип интеллектуализации САПР. Заметим, что в области CASE-технологий общего применения в качестве одного из перспективных направлений также рассматривается создание интеллектуального инструментария и переход от CASE к BASE (Brain Assisted Software Engineering) [5].

Необходимость перехода от традиционных САПР к интеллектуальным информационным технологиям проектирования была осознана в 1990-х годах. К этому времени относятся первые предложения о структуре многоаспектного описания объектов проектирования и включении в состав модели объекта активных компонент – методов [6], а также появление системы ICAD [7], позволяющей описывать методику проектирования изделия с помощью правил, определений, отношений и ограничений. К середине 1990-х годов аналогичный подход был принят разработчиками САПР промышленных предприятий в виде концепции Enterprise Engineering Modeling (ЕЕМ) [8], в соответствии с которой модели промышленных установок включают в себя, наряду с геометрией, физические и функциональные свойства объектов. К этому же периоду относится начало работ над интеллектуальными САПР в Институте машин и систем [9, 10]. В ходе этих

работ были сформулированы общие принципы построения и предложена возможная структура подобной системы.

К настоящему времени наиболее мощные CAE/CAD/CAM-системы оснащены модулями работы с инженерными знаниями (например, Unigraphics Knowledge Fusion и CATIA Knowledgware), имеются убедительные примеры их эффективного применения при проектировании самолетов Су и Ан. Однако ни одна из упомянутых систем не решает проблемы сокращения трудоемкости создания САПР и привлечения к их созданию непрограммирующих экспертов предметной области, поскольку разработка баз знаний сопровождается программированием на специальных языках.

По мнению авторов, общим источником перечисленных выше проблем служит отсутствие в распоряжении разработчиков специализированных САПР соответствующего инструментария. В этом смысле исключением из общего ряда являются системы российской разработки – T/FLEX САПР ИМ (САПР изделий машиностроения) [11] и интегрированная инструментальная среда СПРУТ (Система проектирования универсальной технологии) [12]. Обе системы отличаются исключительно высоким уровнем автоматизации проектирования специализированных программных средств САПР и допускают работу с ними непрограммирующих профессионалов. Вместе с тем им присущи общие ограничения – жесткая привязка к определенной CAD-системе (соответственно, T/FLEX CAD и SprutCAD). Такое построение систем не вполне соответствует ведущей современной тенденции компоновки САПР из компонентов, созданных разными разработчиками, и современным условиям, когда на большинстве предприятий уже внедрены какие-либо CAD/CAM-системы. Кроме того, принятая в качестве основной схема нисходящего проектирования затрудняет включение в маршрут проектирования отдельных фрагментов проектирования «снизу – вверх», что в ряде случаев было бы весьма полезно.

Цель настоящей работы заключается в формировании основных требований к функциям и структуре интеллектуальной инструментальной среды создания специализированных САПР с учетом современных условий использования программных средств САПР в проектирующих организациях и преобладающих тенденций в развитии автоматизированных систем.

Путь решения перечисленных проблем автоматизации проектирования сложных объектов видится в построении САПР как интеллектуальной системы. В работе [2] сформулированы основные принципы компьютеризации инженерной деятельности – интеграция, индивидуализация, интеллектуализация.

Интеграция предполагает наличие единой для всех участников разработки информационной среды и формирование единой информационной модели изделия (многоаспектного описания) как общего источника и общего хранилища проектных данных.

Индивидуализация призвана обеспечить максимальное соответствие возможностей программного обеспечения конкретного автоматизированного рабочего места составу решаемых задач и исключить функциональную избыточность, характерную для большинства готовых программных средств САПР.

Интеллектуализация предполагает использование системы понятий предметной области, представление знаний о проектировании изделий или процессов в явном виде и естественной форме и автоматическую генерацию алгоритмов и программ проектирования.

Именно эти принципы были положены в основу построения инструментальной среды СПРУТ, их справедливость подтверждена многочисленными примерами создания специализированных систем с элементами искусственного интеллекта. Они были приняты авторами в качестве исходных при разработке прототипа интеллектуальной инструментальной среды – комплекса средств компьютеризации инженерных знаний. При этом основное внимание было сосредоточено именно на обеспечении «интеллектуального уровня» создаваемых с ее помощью будущих САПР, прежде всего – на придании им способности к принятию проектных решений без непосредственного участия проектировщика.

Накопленный авторами опыт работы с системой СПРУТ позволяет утверждать, что для этого необходимо включение в состав САПР двух основных компонентов – объектно-ориентированной метамодели (обобщенной информационной модели класса технических систем) и базы инженерных знаний. В первой версии инструментальной среды были с незначительными изменениями реализованы основные принципы построения метамодели, изложенные в работе [2]. Метамодель некоторого класса технических систем представляется иерархической структурой, элементами которой (классами) являются составные части изделия – агрегаты (модули), сборочные единицы различных уровней и детали. Класс соответствует некоторому множеству реальных предметов (объектов). Объекты имеют один и тот же перечень свойств и подчиняются одним и тем же правилам строения и поведения (методам).

Классы метамодели могут быть связаны между собой отношениями двух видов:

- отношения «целое – часть» (связи типа И, «из чего состоит») описывают иерархическую подчиненность объектов различных уровней, например, структуру изделия;
- отношения «род – вид» (связи типа ИЛИ, «каким бывает») характеризуют разновидности одного и того же объекта, например, варианты конструктивного исполнения.

Связанные между собою классы объединяют в библиотеки. Библиотека содержит набор классов и связей между ними и задает структуру базы данных проекта. Соответствующая ей база данных объектов содержит значения свойств каждого из экземпляров изделия и соответствует фрагменту архива PDM-системы. Значения свойств отдельных объектов определяются подключенными к классам методами (прикладными программами проектирования). В общем случае метамодель некоторого класса технических систем описывает все известные альтернативные решения на всех иерархических уровнях детализации. Структура метамодели некоторого класса технических систем показана на рис. 2.

При проектировании изделия его свойства подразделяют на входные и выходные. Входные свойства (X) представляют собой независимые

переменные, используемые методами класса для определения значений зависимых выходных переменных (Y). Методы представляют собой правила преобразования входных свойств в выходные $F : X \rightarrow Y$, определяющие поведение класса.

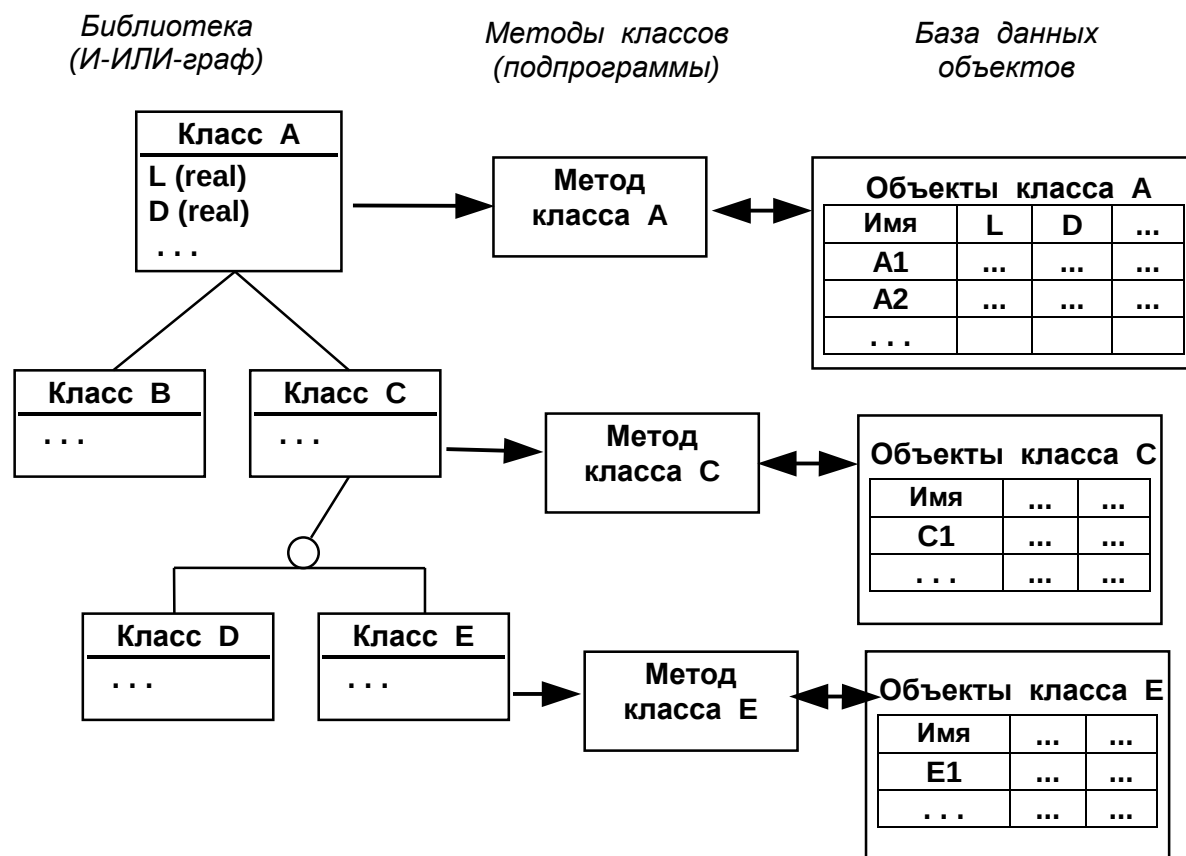


Рисунок 2 – Структура метамодели

Методы реализуются в виде программных модулей, которые должны быть сгенерированы автоматически с помощью специального инструментального средства – системы генерации баз знаний. Архитектура класса показана на рис. 3.

Наличие в классе активной части (метода), содержащей инженерные знания о проектировании объектов этого класса (правила выбора значений параметров и расчетные зависимости), обуславливает его реакцию на внешние воздействия со стороны среды проектирования. Эта реакция выражается в изменении структуры, значений внутренних свойств и выходных параметров объекта в зависимости от значений входных свойств. При таком построении модели класса соблюдаются основные принципы объектно-ориентированного моделирования – инкапсуляция, модульность и иерархичность.

Метамодель с подключенными к ней методами (т.е. прикладными программами структурного и параметрического синтеза) представляет собой инженерный прототип специализированной системы проектирования. Поэтому

описание информационной модели изделия является одновременно одним из основных этапов создания такой специализированной САПР.

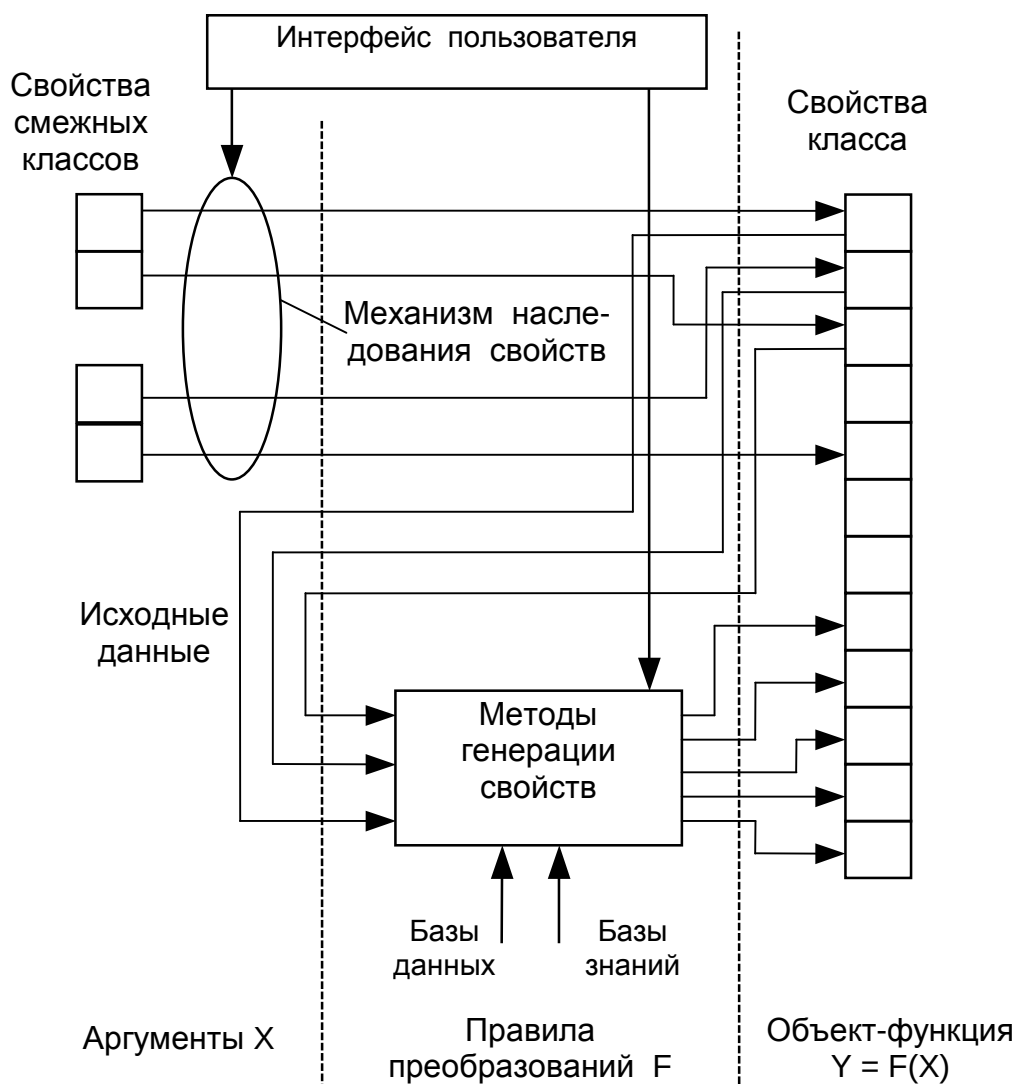


Рисунок 3 – Архитектура класса

Кроме описанных принципов, было признано необходимым воплотить в создаваемой системе возможность генерации отторгаемого кода прикладных программ проектирования, что позволит эксплуатировать созданные специализированные САПР вне среды их разработки. Это позволит избежать функциональной избыточности автоматизированных рабочих мест и снизить их стоимость. Такое свойство среды разработки условно было названо инструментальностью.

В то же время разработчики не сочли необходимым разрабатывать собственный язык программирования и собственные универсальные программные средства (СУБД, CAD- и CAM-модули и др.), предполагая

обеспечить совместимость создаваемого инструментария с готовыми программными средствами САПР такими путями:

- расширением возможностей работы с внешними базами данных (как нормативно-справочными, так и БД проекта);
- реализацией подключения внешних программ;
- введением в состав среды подсистемы взаимодействия с CAD-системами (на первом этапе разработки – с SolidWorks, а в дальнейшем и с другими системами).

Такой подход представляется оправданным в условиях внедрения инструментальных средств в организации, уже использующей какие-либо средства САПР (СУБД, расчетные программы, CAD/CAM-системы). Следовательно, для построения САПР с элементами искусственного интеллекта на основе изложенных принципов был признан минимально достаточным следующий состав инструментальных средств:

- подсистема моделирования структуры изделия и проектных альтернатив – метамоделлер как средство построения И-ИЛИ-графа;
- подсистема генерации баз знаний – интеллектуальная система программирования;
- подсистема взаимодействия с CAD-системами – интеллектуальная система геометрического моделирования.

В настоящее время разработан первый прототип (опытная версия) инструментальной среды, проводится его тестирование на задачах проектирования общетехнических объектов. Особое внимание уделяется полноте и корректности реализации проектных процедур структурного синтеза, составляющих основные «узлы противоречий» в традиционных САПР.

Порядок создания специализированной системы проектирования с использованием разработанных инструментальных средств реализуется в такой последовательности этапов:

1. Построение И-ИЛИ-графа для класса изделий (рис. 4). Одновременно с построением структуры классов формируется перечень свойств (словарь) каждого класса. Эти свойства в дальнейшем используют при создании методов классов. Словарь выполняет функции интеллектуального интерфейса системы.

2. Создание параметризованных геометрических моделей классов, представленных в метамодели. Выполняется штатными средствами CAD-системы.

3. Установление связи между информационной и геометрической моделями детали (сборочной единицы), включая задание соответствия свойств классов параметрам моделей.

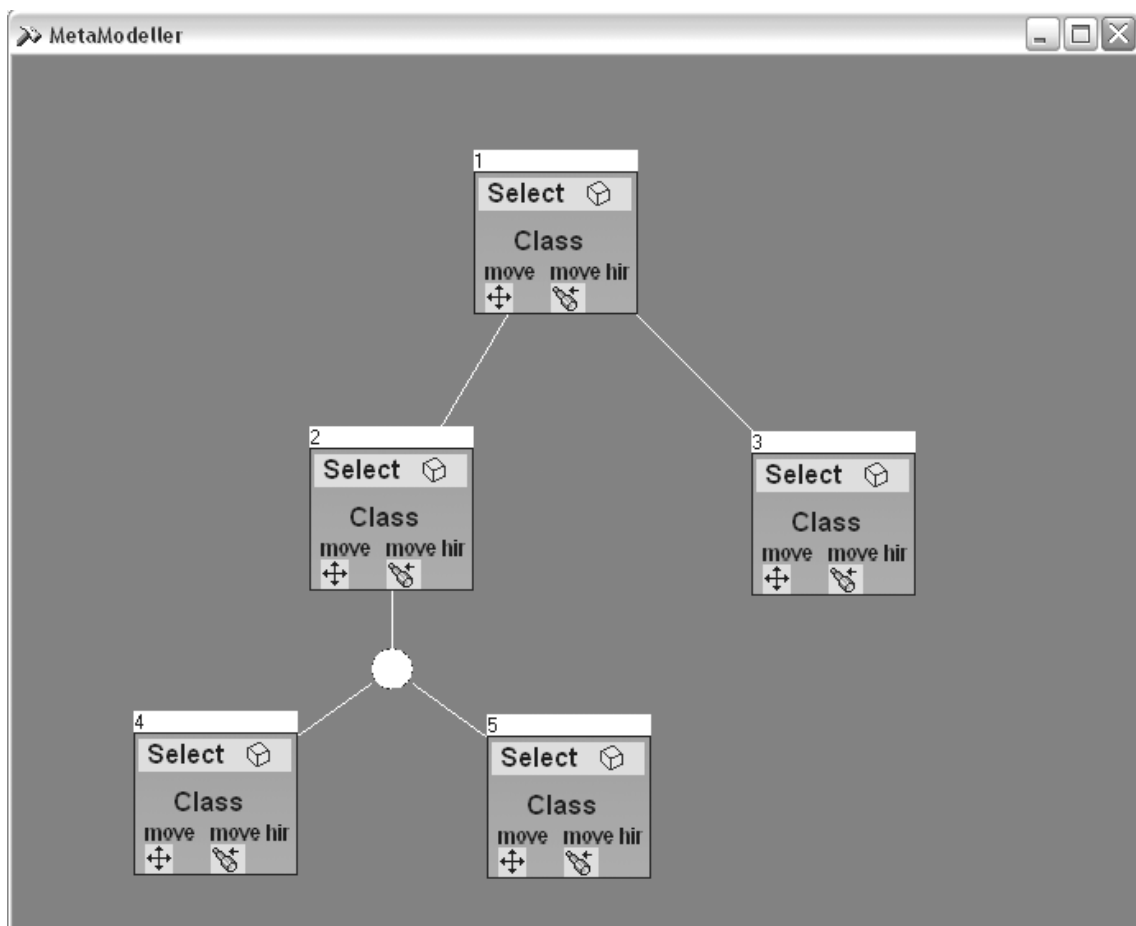


Рисунок 4 – Пример И-ИЛИ-графа (фрагмент)

4. Задание видов соединений между элементами сборки в метамоделлере и отображение их в среде CAD-системы (рис. 5).

5. При необходимости – задание перечня наследуемых свойств (например, с уровня сборочной единицы на уровень детали или с уровня детали на уровень элементов формы).

6. Установление функционально-логических связей между свойствами изделия. Проводится в соответствии с методиками проектирования либо на основании литературных источников. Опытная версия системы поддерживает работу с двумя основными формами представления инженерных знаний – формулами и таблицами, что обеспечивает естественное преобразование элементов знаний из внешнего во внутреннее представление (а информационных ресурсов – из пассивной формы в активную).

7. Создание базы инженерных знаний по проектированию изделия. Выполняется в среде подсистемы генерации баз знаний (рис. 6). База знаний формируется из первичных элементов – модулей инженерных знаний (МИЗ), каждый из которых представляет собой элементарную функционально-логическую зависимость между входным и выходным свойствами класса, т.е. формулу или группу формул, таблицу для выбора значений параметра и т.п. Созданные и отлаженные модули объединяются в метод – подпрограмму проектирования изделия. Генерация подпрограмм

выполняется автоматически, т.е. подсистема выполняет функции интеллектуальной системы программирования.

8. Автономное тестирование модулей знаний и методов.

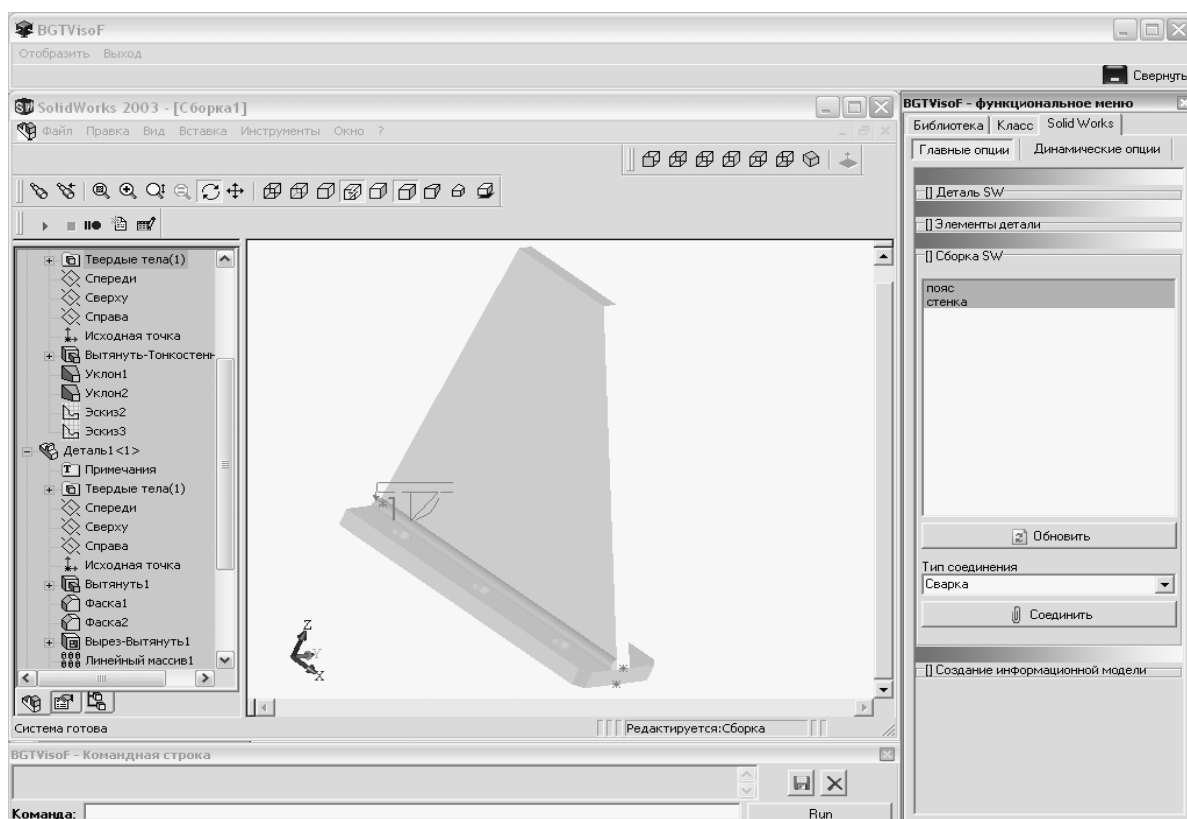


Рисунок 5 – Создание соединения деталей
(справа – окно метамоделлера)

9. Подключение методов к классам метамодели. Состоит в установлении соответствия между входными и выходными свойствами метода и класса.

10. Комплексное тестирование сгенерированной системы во взаимодействии с CAD-системой. При необходимости – внесение изменений в методику проектирования, т.е. редактирование элементов знаний во внешнем представлении и повторная генерация кода подпрограмм.

Такое построение инструментальной среды предполагает работу с ней непрограммирующего эксперта предметной области. Создаваемые им базы знаний формируются как программные средства модульной структуры, открытые для последующей модификации без привлечения профессиональных программистов. В последующих статьях авторы планируют привести более подробное описание принципов построения, приемов реализации и основных результатов тестирования по всем компонентам инструментальной среды.

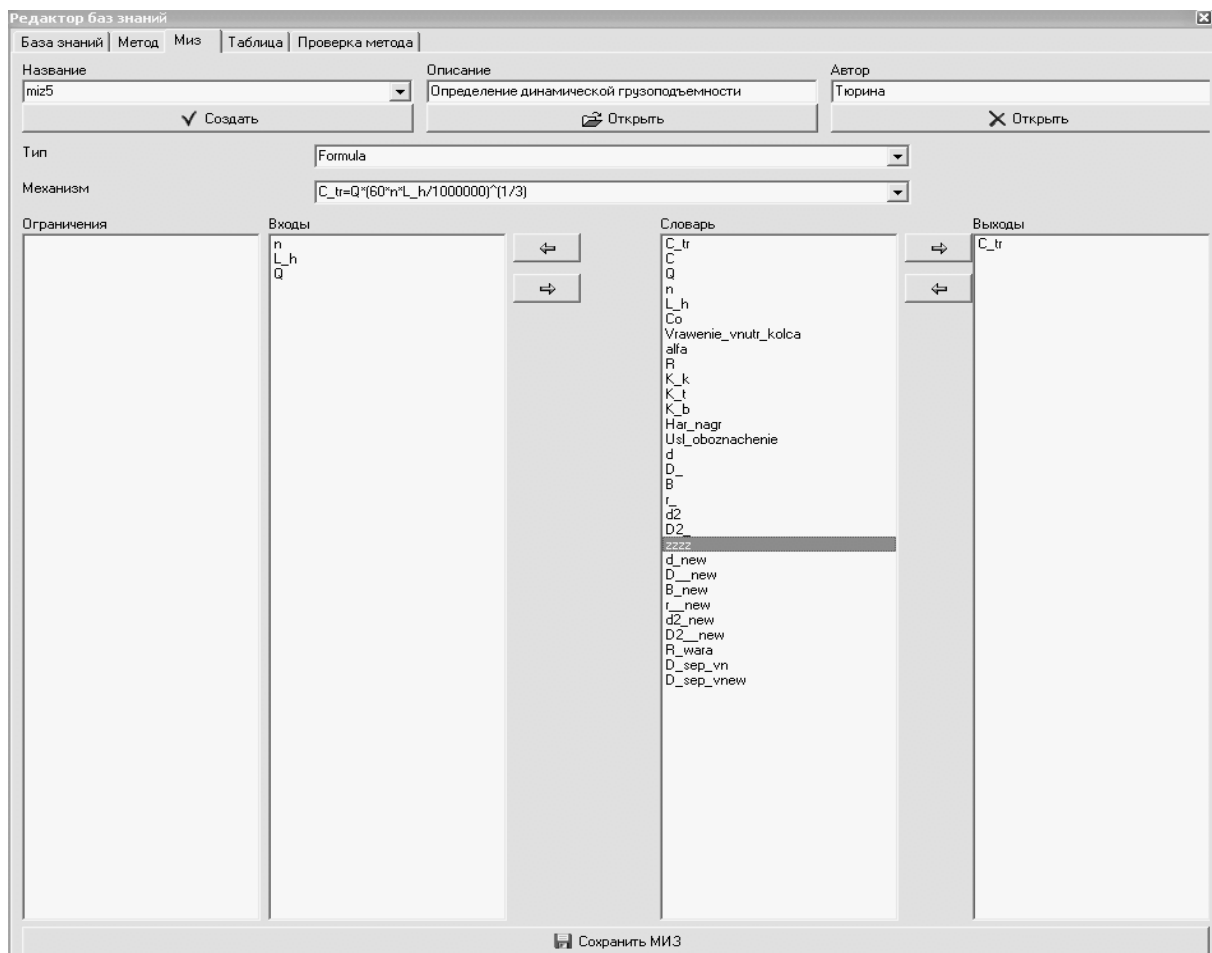


Рисунок 6 – Экран работы с базой инженерных знаний

При выполнении работ получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы причины недостаточной эффективности современных машиностроительных САПР на ранних стадиях разработки новой техники.
2. Выделены перспективные направления интеллектуализации САПР: моделирование структуры изделия и проектных альтернатив, автоматическая генерация алгоритмов и программ проектирования, реализация процедур структурного синтеза, в том числе на уровне геометрических моделей.
3. Предложена структура интеллектуальной инструментальной среды создания специализированных САПР, учитывающая ведущие тенденции системной интеграции.
4. Разработан и проходит тестирование прототип инструментальной среды. Предварительные итоги тестирования подтверждают основные предположения о возможности существенного повышения эффективности САПР за счет использования средств инженерии знаний, а также позволяют собрать материал для уточнения направлений дальнейших исследований и разработок.

Список литературы

1. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. Евгеньев Г.Б. Системология инженерных знаний. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 376 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 360 с.
4. Долин Г. Интеллектуальные САПР в Internet // Компьютер-пресс. – 1997. – № 12. – С.269-272.
5. Вороненко Д. Будущее CASE-средств // Компьютеры + Программы. – 1996. – № 7. – С. 28-31.
6. Краузе Ф.-Л., Армбруст П. Базы методов и моделей изделий как основа построения системы CAD/CAM // Машиностроительное производство: экспресс-информация ВНИИТЭМР. Сер. Автоматизированные системы проектирования и управления (зарубежный опыт). – 1989. – Вып.2. – С. 8–15.
7. The Emergence of Smart CAD Software // Computer Graphics World. – 1990. – July. – P. 55.
8. Бентли К. Инженерные ценности и новая версия MicroStation. // САПР и графика. – 1997. – № 7. – С. 42–43.
9. Принципы построения интеллектуальных систем инженерного обеспечения производства / Н.Э. Тернюк, В.Ю. Гранин, С.Л. Тарасенко, К.Б. Балушок // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Материалы Междунар. научно-технич. конф. MicroCAD'96. – Харьков, Мишкольц, Магдебург, 1996. Ч.2. – С. 187-188.
10. Синтез принципов действия машин и моделирование рабочих процессов средствами интеллектуальной САПР / Н.Э. Тернюк, В.Ю. Гранин, Р.И. Ендальцев, К.Б. Балушок, С.В. Худяков // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Труды Междунар. научно-технич. конф. MicroCAD'97. – Харьков, Мишкольц, Магдебург, 1997. Ч.2. – С. 387– 391.
11. T/FLEX САПР ИМ – первое знакомство / А. Белявский, А. Давыдкин, М. Красиков, М. Никулин // САПР и графика. – 2002. – № 1. – С. 48–51.
12. Евгеньев Г.Б. Как я пришел к СПРУТ-технологии // Компьютер-пресс. – 1997. – № 3. – С. 202–209.