

Применение CAD/CAE-систем для автоматизированного проектирования станочных приспособлений

К.С. Кульга (УГАТУ, Уфа), А.В. Половинкин (НПП "Мотор", Уфа)

Актуальность проблемы

Детали и сборочные единицы (ДСЕ) авиационных двигателей характеризуются сложностью и разнообразием конструкций, что приводит к необходимости разработки значительного количества станочных приспособлений (СП) для механической обработки.

Применение СП позволяет:

- надежно базировать и закреплять обрабатываемую ДСЕ с сохранением её жесткости в процессе механической обработки;
- стабильно обеспечивать высокое качество обрабатываемых деталей при минимальной зависимости качества от квалификации сотрудника предприятия;
- повысить производительность труда в результате механизации приспособления;
- облегчить условия работы и обеспечить её безопасность;
- расширить технологические возможности металлорежущего станка;
- применять технически обоснованные нормы времени.

Системный анализ существующих бизнес-процессов (БП) проектирования СП, основанных на применении CAD-систем в базовой конфигурации, выявил следующие недостатки:

- создание нового СП основано на экспертных оценках конструкции, требует значительных затрат времени на изучение проектной и справочной информации, а также на проектирование СП;
- учитываются только общие вопросы базирования заготовок с профильными посадочными поверхностями;
- не учитываются особенности проектирования и технологичности базовых деталей СП, что приводит к снижению качественного уровня конструкции СП;
- преобладание рутинных функций при проектировании и оформлении комплекта конструкторской документации на технологическую оснастку, осуществляемых с помощью CAD-систем в базовой конфигурации и баз данных типовых конструктивных элементов.

Таким образом, создание и экспериментальная апробация автоматизированной информационной системы (АИС), предназначенной для повышения эффективности проектирования СП, является актуальной научной задачей.

Цель

Разработка моделей и методов создания АИС для проектирования СП, предназначенных для

механической обработки ДСЕ авиационных двигателей, включая программное взаимодействие на уровне наборов данных и управления в едином информационном пространстве (ЕИП) с интегрированной АИС (ИАИС) предприятия – *Stalker PLM* [10].

Теоретическая часть

Разработка программного обеспечения (ПО) АИС для проектирования станочных приспособлений осуществлялась на основе методологии, подробно описанной в монографии [1].

Функциональная модель АИС

Объектно-ориентированная функциональная модель (ФМ) АИС разработана с применением методологии *Rational Unified Process (RUP)* и платформенно-независимого объектно-ориентированного языка *UML (Unified Modeling Language)* [2, 9].

Этапы разработки объектно-ориентированной ФМ АИС [1, 5]: бизнес-моделирование; определение функциональных и нефункциональных требований; анализ и проектирование; реализация; тестирование; развертывание. Каждый этап включал выполнение задач для достижения конечной цели функционального моделирования – разработка ПО АИС для проектирования СП.

На этапе бизнес-моделирования ФМ АИС были решены следующие задачи:

- определены бизнес-цели проектирования. В предполагаемой структуре АИС реализована реструктуризация бизнес-целей проектирования СП;
- описаны БП проектирования СП. Данная задача решена для формирования единого понимания БП предлагаемой структуры АИС разработчиком и сотрудниками предприятия. Для этого ФМ БП спроектирована как иерархия диаграмм. На самом последнем уровне иерархии ФМ на диаграмме прецедентов (*use case diagram*) размещаются собственно БП и связанные с ними бизнес-роли, работники, классы, сущности;
- установлены требования. Одна из важнейших задач этапа бизнес-моделирования – определение функциональных и нефункциональных требований (*requirements*) к ФМ АИС. Установление требований к ФМ реализовано на основе анализа перспективных тенденций развития АИС и результатов исследования БП проектирования СП;
- определены бизнес-объекты АИС: бизнес-работники, бизнес-роли, сущности, классы.

На этапе определения требований были реализованы функциональные и нефункциональные требования в виде ПО ФМ предлагаемой структуры АИС.

Следующий этап – анализ и проектирование. Для реализации перехода от этапа бизнес-моделирования к разработке ПО в ФМ прецедентов разработаны следующие диаграммы:

- прецедентов (*use case diagram*) – функции АИС при работе с сущностями и видами деятельности (*activity diagram*) – формы интерфейса, последовательность реализации бизнес-логики и классы. Примеры реализации этих диаграмм ФМ АИС приведены на рис. 1, 2 [9];

- динамического взаимодействия объектов каждого прецедента в виде графа (*sequence diagram*) и в табличной форме (*collaboration diagram*).

На этом этапе разработана логическая и физическая модель данных АИС проектирования СП. Целью разработки модели данных является отображение классов, которые реализуют функциональные и нефункциональные требования АИС. Модель данных АИС разработана на основе диаграммы классов (*class diagram*). На первом уровне размещались пакеты с классами подсистем, на следующем уровне – пакеты с классами каждого требования, на самом последнем уровне – собственно классы, относящиеся к конкретному требованию.

Разработанная объектно-ориентированная ФМ является основой для создания информационно-математической модели и базовых информационных технологий АИС проектирования СП.

Информационно-математическая модель АИС

Информационно-математическая модель (ИММ) АИС проектирования СП для механической обработки ДСЕ отличается реализацией предложенных алгоритмов и методов расчетов размерных, точностных, силовых и жесткостных параметров СП, автоматического формирования геометрических 3D-моделей и конструкторской документации СП с применением API-функций (*Application Programming Interface*) CAD-систем.

Основой для создания ИММ являются разработанная объектно-ориентированная ФМ АИС, математические модели и методы для определения размерных характеристик, точностных и силовых расчетов конструкций СП [3], автоматического построения параметрических геометрических 3D-моделей и ассоциативных конструкторских

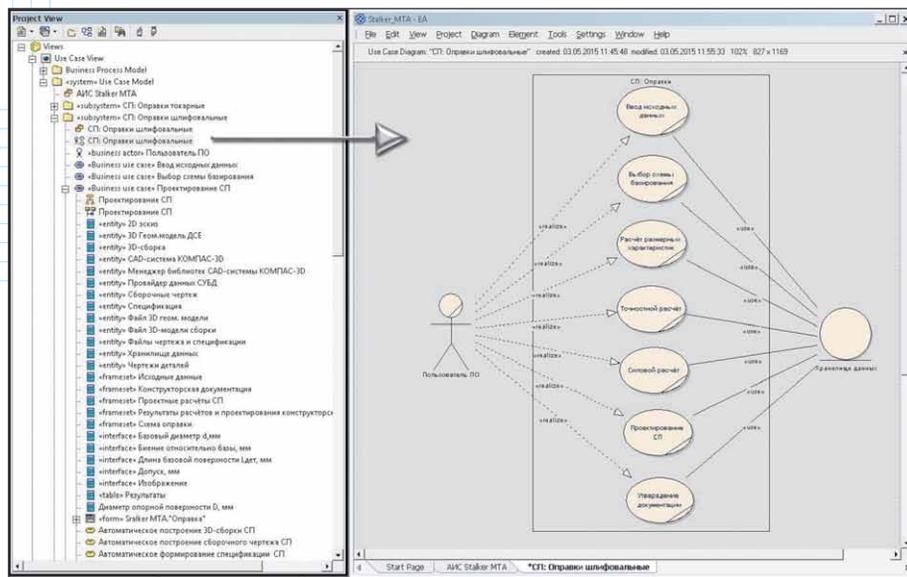


Рис. 1. Диаграмма Use case diagram ФМ АИС

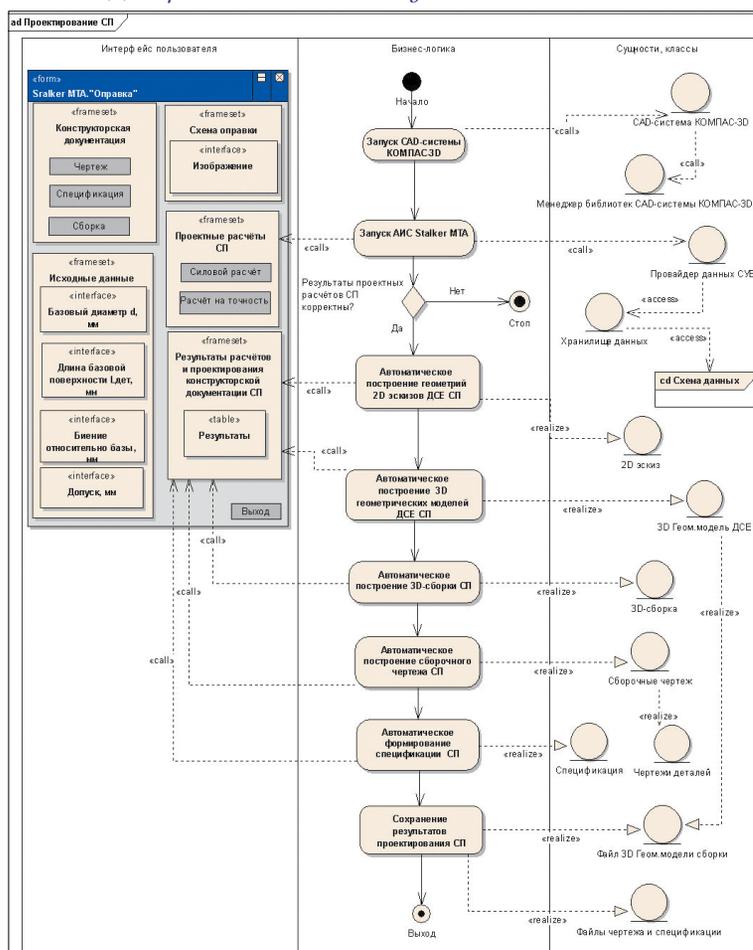


Рис. 2. Диаграмма Activity diagram ФМ АИС

чертежей, формирования спецификации на основе API-функций CAD-системы.

В качестве примера рассмотрим информационно-математическую модель АИС для СП “Оправка шлифовальная”. Исходным набором данных для

проектирования СП послужат рабочие чертежи заготовки и готовой детали, операционный эскиз обработки заготовки, сведения о металлорежущем станке, режущих инструментах, режимах резания, последовательности технологических переходов и сведения о программе выпуска партии ДСЕ.

Заготовка для механической обработки, закрепленная в СП “Оправка шлифовальная”, должна удовлетворять следующим условиям (все размеры указаны в мм):

– $D \leq D_{max}$, где D – наружный диаметр заготовки; D_{max} – максимально допустимый наружный диаметр заготовки в зависимости от модели металлорежущего станка;

– $d \leq d_{max}$, где d – посадочный диаметр заготовки; d_{max} – максимально допустимый

посадочный диаметр заготовки (рекомендуемое значение $d_{max} = (60...80)$). При превышении этого размера механическая обработка заготовки осуществляется на планшайбе металлорежущего станка;

– $l \leq 2d$, где l – длина заготовки. При превышении этого размера затрудняется снятие заготовки, поэтому применяются другие конструкции СП оправка шлифовальная;

– $l \geq 0.1d$. При меньшей длине заготовки невозможно базирование в СП;

– не должны обрабатываться упорные и прижимные поверхности заготовки.

Расчеты размерных характеристик СП “Оправка шлифовальная” производятся на основе предложенной методики, приведенной в табл. 1.

Табл. 1. Методика расчета размерных характеристик СП “Оправка шлифовальная”

Расчетная схема СП	Расчетная схема СП
<p>Оправка для шлифования наружного диаметра заготовки</p>	<p>Оправка для шлифования внутреннего диаметра заготовки</p>
Размерная характеристика СП, мм	Размерная характеристика СП, мм
<p>$l = (0,9...0,95) \cdot l_{дет}$;</p> $D_{ш} = \begin{cases} D_y + (2...5) \text{ мм, при } D_y = D_{обр} \\ D_y \text{ при } D_y \geq D_{обр} \end{cases}$ <p>где $D_{обр}$ – диаметр обрабатываемой поверхности</p> <p>$d_2 \leq d_p - 2,5P$;</p> <p>где P – шаг резьбы;</p> <p>S – размер под ключ, значение размера выбирается из ГОСТ 6424-73;</p> $l_6 = \begin{cases} (8...10), \text{ при } S \leq 8 \\ (10...15), \text{ при } S > 8 \end{cases}$ <p>$D_2 = (0,9...1,1) \cdot D_1$;</p> <p>$l_y = l_{ш} = (8...12)$;</p> <p>$d_1 = l_1 = (30...50)$;</p> <p>$l_3 = (2...3) \cdot P$;</p> <p>$H = (0,8...0,9) \cdot d_1$;</p> <p>$d_{ш,отв}$ – значение размера выбирается из ГОСТ 14034-74 в зависимости от значения d_2;</p> <p>$d_{ш} = 1,1 \cdot d_p$;</p> <p>$l_5 = 0,5 \cdot l_1$;</p> <p>$c = (1...1,6) \text{ мм}$;</p> <p>где TA – допустимая погрешность изготовления ДСЕ.</p>	<p>$H = (0,9...0,95) l_{дет}$;</p> <p>$D_p = (1,2...1,3) D$;</p> <p>где D – базовый диаметр заготовки. Значение размера D_p выбирается из ГОСТ 24705-2004;</p> <p>$D_1 = D_p + (10...15)$;</p> <p>$l_p = (10...12) P + l_{пр}$;</p> <p>где $l_{пр}$ – длина проточки для соответствующего размера D_p;</p> <p>P – шаг резьбы;</p> <p>$l_2 \approx l_p + 5$;</p> <p>$l_4 = \frac{L_2}{2}$;</p> <p>$L_1 = l_1 + l_2$;</p> <p>$l_3 = (5...10)$;</p> <p>$L_2 = l_p + l_3$;</p> <p>$d_4 = h$ в зависимости от значения размера;</p> <p>$d_2 = d_3 = 1,1d$;</p> <p>$d_1 = l_1 = d_3 + (10...15)$;</p> <p>$a = a_1 = (\frac{1}{3}... \frac{1}{5}) TA$;</p> <p>где TA – допустимая погрешность изготовления ДСЕ;</p> <p>$c = (1...1,6)$.</p>

Точность обработки детали оценивается сопоставлением расчетной погрешности с допустимой величиной TA :

$$TA \geq \frac{1}{K_{СТ}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (1)$$

где TA – допустимая погрешность изготовления ДСЕ; $K_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий долю динамической составляющей суммарной погрешности [3, 8]; Δ_i – элементарная статическая составляющая. Величина Δ_i определяется в зависимости от типа и схемы выверки СП, а также допусков на ДСЕ и СП [3, 8].

Силовой расчет заключается в определении силы закрепления заготовки детали в СП и основывается на решении системы уравнений равновесия сил и моментов. На рис. 3 приведена расчетная схема СП “Оправка шлифовальная” для механической обработки наружного диаметра заготовки.

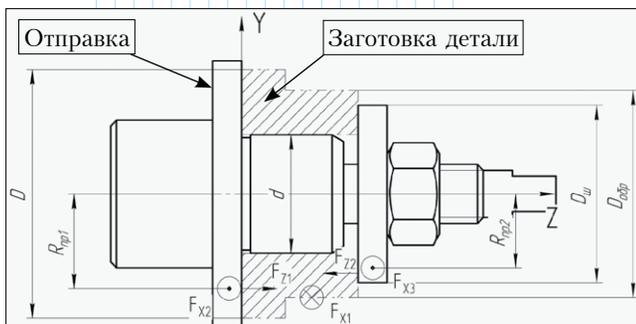


Рис. 3. Расчетная схема для силового расчета СП “Оправка шлифовальная” (для шлифования наружного диаметра заготовки)

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

- F_{X1} – проекция силы резания на ось X ;
- F_{Z1} , F_{Z2} – силы, действующие на заготовку;
- F_{X2} , F_{X3} – силы трения;
- $R_{уп1}$, $R_{уп2}$ – приведенные радиусы трения в упорной поверхности и месте зажима СП, соответственно;
- $D_{обп}$ – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки.

Расчетной схеме СП (см. рис. 3) соответствует следующая система уравнений равновесия заготовки:

$$\left. \begin{aligned} F_{Z1} - F_{Z2} &= 0 \\ F_{X1} \cdot \frac{D_{обп}}{2} - F_{X2} \cdot R_{уп1} - F_{X3} \cdot R_{уп2} &= 0 \\ F_{X2} &= F_{Z1} \cdot f \\ F_{X3} &= F_{Z2} \cdot f \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения;

$$R_{уп1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \text{ – приведенный радиус трения в упорной поверхности;}$$

$$R_{уп2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D_{III}^3 - d^3}{D_{III}^2 - d^2} \text{ – приведенный радиус трения в месте зажима.}$$

На рис. 4 приведена расчетная схема СП “Оправка шлифовальная” для механической обработки внутреннего диаметра заготовки.

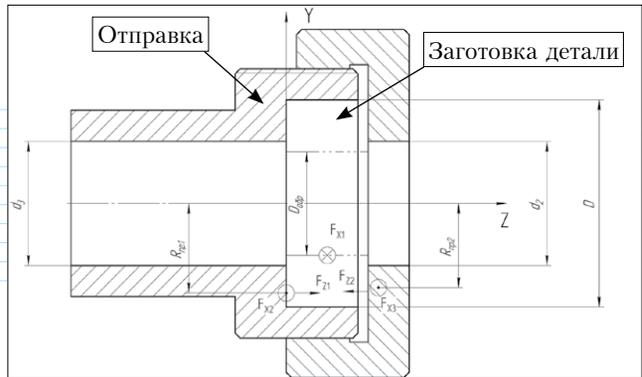


Рис. 4. Расчетная схема для силового расчета СП “Оправка шлифовальная” (для шлифования внутреннего диаметра заготовки)

Этой расчетной схеме СП соответствует следующая система уравнений равновесия заготовки:

$$\left. \begin{aligned} F_{Z1} - F_{Z2} &= 0 \\ F_{X1} \cdot \frac{D_{обп}}{2} - F_{X2} \cdot R_{уп1} - F_{X3} \cdot R_{уп2} &= 0 \\ F_{X2} &= F_{Z1} \cdot f \\ F_{X3} &= F_{Z2} \cdot f \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения;

$$R_{уп1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3 - d_2^3}{D^2 - d_2^2} \text{ – приведенный радиус трения в упорной поверхности;}$$

$$R_{уп2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3 - d_3^3}{D^2 - d_3^2} \text{ в месте зажима.}$$

Исходя из полученного усилия закрепления, рассчитывается исходная сила W , которую надо приложить к зажимному механизму для получения усилия закрепления. В случае, если данное значение больше допустимого $[W] = 100$ Н, применяется больший диаметр резьбы или рассматривается случай механизированного зажима [8].

Базовые информационные технологии АИС

Для реализации этого этапа методологии [1] авторами было разработано программное обеспечение АИС *Stalker MTA* [5] с использованием менеджера библиотек и API-функций CAD-системы КОМПАС-3D [4, 6].

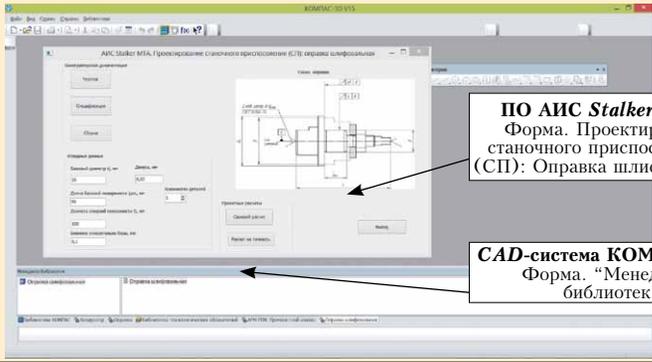
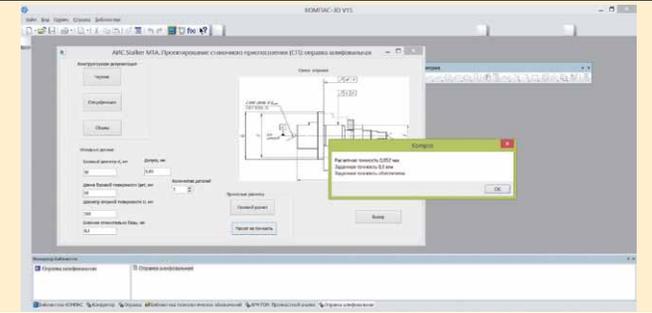
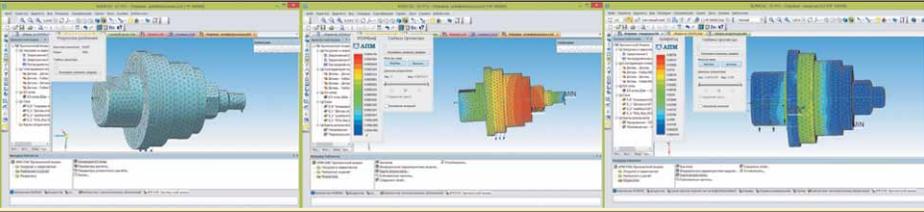
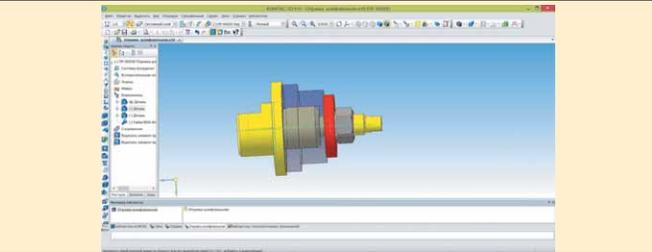
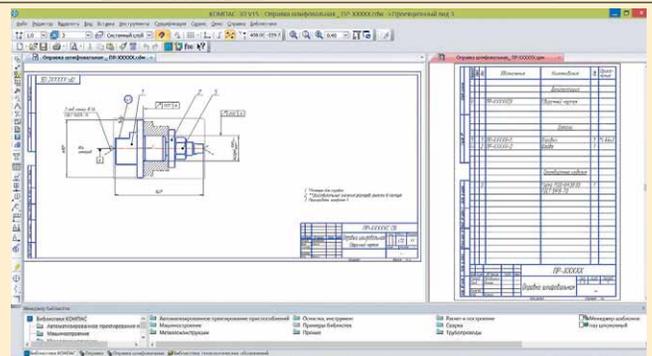
Рассмотрим пример автоматизированного проектирования СП “Оправка шлифовальная”, предназначенного для механической обработки детали типа “тело вращения” на токарном металлорежущем станке, на основе разработанного ПО библиотеки “Проектирование станочного приспособления: Оправка шлифовальная” (табл. 2).

ПО разработанной библиотеки АИС *Stalker MTA* подключается к менеджеру библиотек CAD-системы КОМПАС-3D (см. п.п.1, табл. 2) [4, 6].

Для проектирования СП в АИС *Stalker MTA* используются наборы данных электронной структуры изделия, которой управляет ИАИС предприятия – *Stalker PLM* [10].

АИС *Stalker MTA* реализует размерные, точностные и силовые расчеты СП (см. п.п. 2, табл. 2)

Табл. 2. Базовые информационные технологии АИС *Stalker MTA*

№ п.п.	Описание базовой информационной технологии АИС	Реализация базовой информационной технологии АИС
1	Интеграция АИС <i>Stalker MTA</i> и <i>CAD</i> -системы КОМПАС-3D на уровне управления и наборов данных	
2	Размерные, точностные и силовые расчеты СП	
3	Статическое исследование напряженно-деформированного состояния конструкции СП "Оправка токарная" с помощью МКЭ	
4	Автоматическое построение параметрических трехмерных геометрических моделей ДСЕ СП	
5	Автоматическое построение сборочного чертежа СП и формирование его спецификации в соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД)	

с использованием методик, приведенных в описании ИММ АИС, а также статические исследования конструкции СП с помощью *CAE*-системы (см. п.п. 3, табл. 2).

ПО АИС *Stalker MTA* автоматически реализует следующие функции:

- построение геометрических 3D-моделей как деталей, так и сборки СП (см. п.п. 4, табл. 2);

Табл. 3. Результаты экспериментальных исследований

Вид проектной работы	Время выполнения, час.	
	Ручное [7]	АИС <i>Stalker MTA</i> [5]
Проектирование и формирование комплекта конструкторской документации для СП (сборочные и деталировочные чертежи, спецификация, пояснительная записка)	4.60	0.15
Проведение размерных, точностных и силовых проектных расчетов	0.95	0.10

- формирование сборочного чертежа СП и его спецификации в соответствии с требованиями ЕСКД (см. п.п. 5, табл. 2).

При автоматизированном проектировании станочных приспособлений ПО АИС *Stalker MTA* реализует запросы к базе данных (БД) стандартных изделий и конструктивных элементов CAD-системы КОМПАС-3D с использованием API-функций. Строка запроса в вышеуказанную БД содержит идентификатор экземпляра изделия, называемый *Location*. Идентификатор *Location* включает все параметры, необходимые для сопоставления с конкретным экземпляром стандартного изделия в БД CAD-системы. Например, идентификатор *Location* для гайки с обозначением “М12 ГОСТ 5915-70” выглядит следующим образом [4, 6]:

PART:Root±30±10±20±©{110±10±50±60[Нет;Без покрытия;Без указания материала;-;12;1,75;18]

Для записи полученных результатов используется разработанная БД системы *Stalker MTA*, которая интегрирована с ИАИС предприятия *Stalker PLM* [10] на уровне наборов данных (рис. 5).

Экспериментальные исследования ПО АИС *Stalker MTA* были проведены с целью оценки затрат времени для выполнения следующих видов проектных работ (рассматривались СП “Оправка шлифовальная” и “Оправка токарная”):

- проведение размерных, точностных и силовых проектных расчетов СП металлорежущих станков;
- проектирование и формирование комплекта конструкторской документации СП в соответствии с требованиями ЕСКД.

Результаты экспериментальных исследований ПО АИС *Stalker MTA* приведены в табл. 3.



Рис. 5. Интеграция наборов данных ИАИС предприятия и CAD-системы КОМПАС-3D

Вывод

На основе предложенных моделей и методов авторами разработано и экспериментально апробировано программное обеспечение АИС *Stalker MTA*, отличающееся реализацией автоматизированного проектирования СП на стадии технической подготовки производства деталей авиационных двигателей и информационным взаимодействием с ИАИС *Stalker PLM* [10] в едином информационном пространстве авиационного предприятия. 📁

Об авторах

- Кульга Константин Станиславович – доктор технических наук, профессор кафедры “Мехатронные станочные системы” ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) – admin@stalkerplm.com
- Половинкин Алексей Владимирович – инженер-конструктор АО “НПП “Мотор” (г. Уфа) – a_plovinkin@mail.ru

Список литературы

1. Кульга К. С., Кривошеев И. А. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством. Москва: Машиностроение, 2011, 377 с.
2. Рамбо Дж. *UML 2.0*. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. Санкт Петербург: Питер, 2007, 544 с.
3. Станочные приспособления. Справочник / Под ред. Б.Н. Вардашкина. Москва: Машиностроение, 1984, 430 с.
4. Компания АСКОН. Комплексные решения для машиностроения // www.ascon.ru
5. Половинкин А. В., Кульга К. С. Модели и методы создания автоматизированной информационной системы для проектирования станочных приспособлений / II международный технологический форум “Инновации. Технологии. Производство”. Рыбинск: РГАТА им. П.А. Соловьева, 2015, с. 132-136.
6. *C3D Labs. The Core 3D*. Комплексные решения для машиностроения // c3dlabs.com
7. Межотраслевые укрупненные нормативы времени на разработку конструкторской документации / Утверждены Постановлением Минтруда СССР от 14.11.1991 года, №69.
8. Малых В. А. Проектирование технологической оснастки. Уфа: УГАТУ, 2001, 188 с.
9. *Sparx Systems. UML Modeling and Lifecycle Tool Suite* // www.sparxsystems.com.au
10. Кульга К.С. Разработка интегрированной АИС для технической подготовки и управления позадказным производством машиностроительного предприятия // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2010, #4, с. 49–56.