

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 658.52:621

К. С. КУЛЬГА

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
PLM-СИСТЕМЫ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Приводятся результаты решения актуальной научно-практической проблемы, заключающейся в повышении эффективности работы машиностроительных предприятий в условиях постоянного роста конкуренции на мировом рынке, на основе разработки методологии автоматизированного проектирования эффективной структуры интегрированной автоматизированной информационной системы класса PLM (Product Lifecycle Management) – системы, предназначенной для автоматизации технической подготовки и оперативного управления дискретным производством в едином информационном пространстве машиностроительного предприятия. *Методология автоматизированного проектирования ИАИС; PLM-система; техническая подготовка производства; оперативное управление дискретным производством*

В 70–90-е годы XX века осуществлялось внедрение интегрированных автоматизированных систем управления (ИАСУ). На этой стадии развития автоматизированных информационных систем (АИС) сформировался класс автономных CAD, CAM, CAE (Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing, Computer Aided Engineering)-систем, возникли стандарты MRP/MRP II (Material Requirements Planning/Manufacturing Resource Planning)-систем. В ИАСУ впервые не только решались задачи автоматизации отдельных производственных процессов, но и начали реализовываться принципы их интеграции в едином информационном пространстве (ЕИП). Это позволило планировать производственные ресурсы предприятия (сырье, материалы, оборудование и т. д.) на основе данных, полученных от поставщиков и потребителей. Также MRP/MRP II-системы позволяли вести прогнозирование, планирование и контроль производства.

Вышеуказанный перечень решаемых задач оказался недостаточным для учетно-хозяйственной деятельности предприятия, в результате консалтинговая компания Gartner Group [1] предложила новую концепцию интегрированных АИС (ИАИС) – ERP (Enterprise Resource Planning)-системы. Концепция ERP включила в себя возможности предшествующих стандартов MRP и MRP-II, плюс к этому в нее была внесена возможность управления и анализа деятельности, стратегического планирования ресурсов для распределения и финансового

планирования, управление цепочками поставок.

Разные ИАИС имеют различные структуры исходных и результирующих данных. Для осуществления взаимодействия разных ИАИС, реализующих бизнес-процессы (БП) основных стадий жизненного цикла изделия (ЖЦИ), определяющих эффективность работы машиностроительного предприятия, в настоящее время до сих пор есть примеры использования методов интеграции на основе специальных групп сотрудников для обработки данных бумажной технической документации (БТД) или программного обмена через структурированные файлы данных, приводящие к ошибкам и потере актуальности данных (рис. 1) [2, 3].

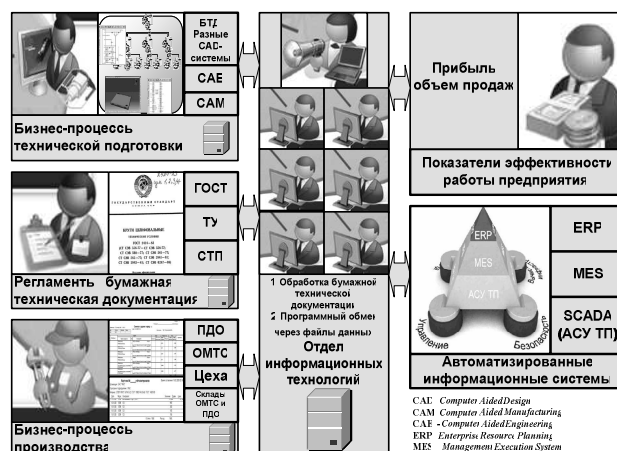


Рис. 1. Пример проекта внедрения ERP-системы на машиностроительном предприятии

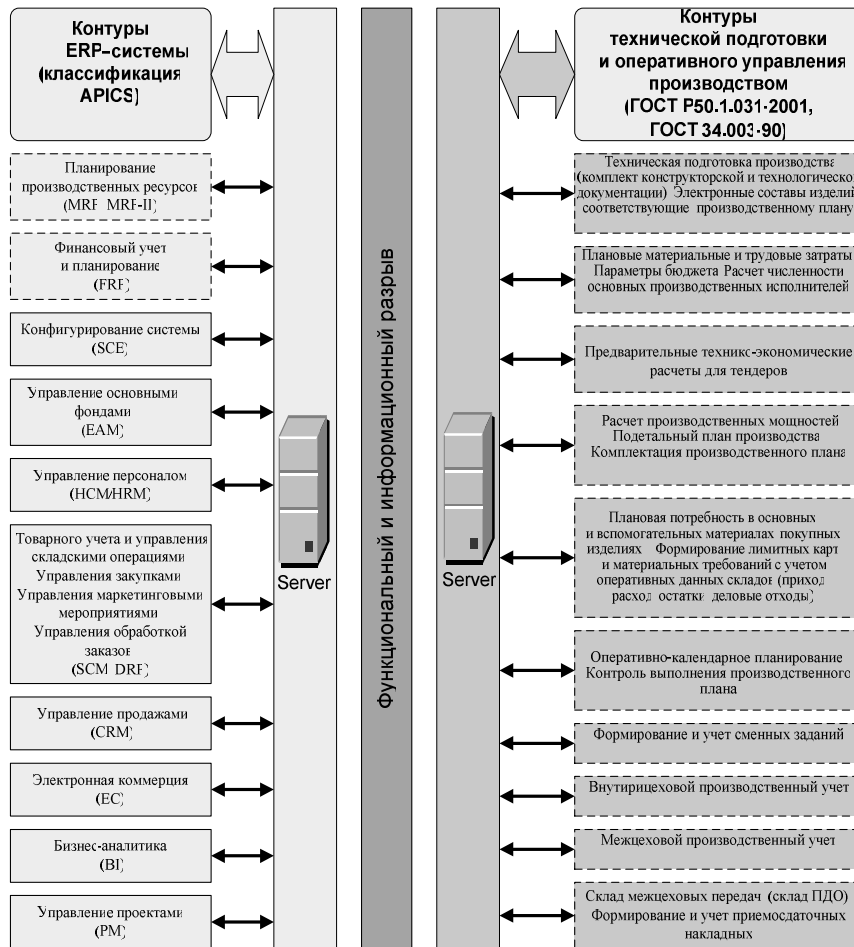


Рис. 2. Иллюстрация функционального и информационного разрыва между контурами ERP-системы и технической подготовки производства

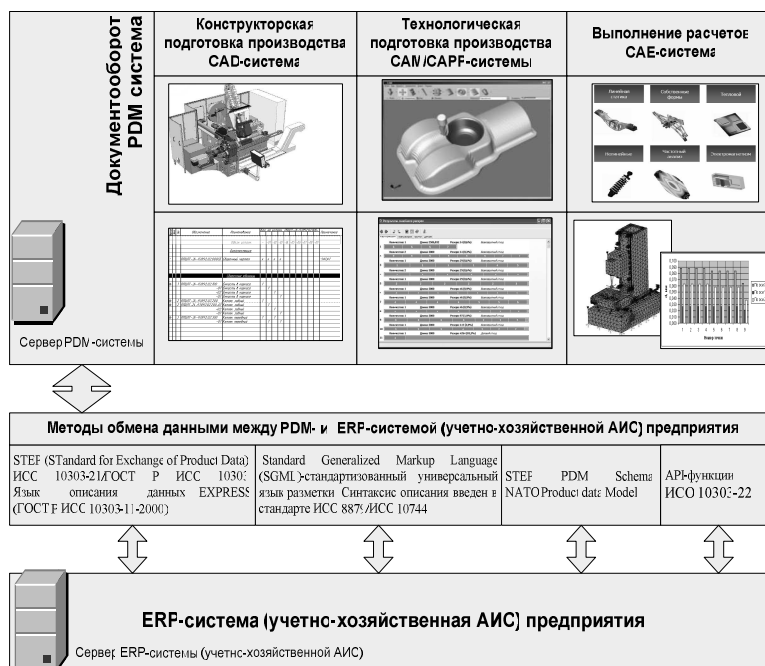


Рис. 3. Существующая реализация интеграции ИАИС класса PLM- и ERP-систем

Развитие глобализации мировой экономической деятельности в начале XXI века привело к постоянному росту конкуренции со стороны других машиностроительных предприятий.

В этих условиях актуальным остается вопрос эффективности применения ERP-системы при разработке и управлении производством высокотехнологичной продукции создаваемой интегрированными промышленными структурами. Это предопределяет необходимость разработки ИАИС класса PLM-систем [2–4].

### 1. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ ИАИС

На основании анализа реализованных проектов выявлено, что основной причиной трудностей внедрения ERP-систем на машиностроительных предприятиях с дискретным характером производства является явный крен в сторону автоматизации и информатизации финансовых и учетно-хозяйственных БП и откладывание «на потом» (или игнорирование) основных задач автоматизации технической подготовки и оперативного управления производственными БП. В результате информация в ERP-системе становится неактуальной, пользователи плохо понимают логику работы системы и испытывают затруднения в анализе получаемых данных. Машиностроительные предприятия расходуют огромные суммы, приобретая ERP-системы только для решения формализованных задач финансового управления и учетно-хозяйственной деятельности.

На рис. 2 показано, что контуры ERP-системы, соответствующие классификации APICS (American Production and Inventory Control Society [5]), не обеспечивают интегрированного решения задач технической подготовки производства и оперативного управления производством машиностроительного предприятия, ограничиваясь стратегическим планированием, что предопределяет существование значительного функционального и информационного разрыва между вышеуказанными контурами [2–3].

А именно в этом, неохваченном ИТ слое оперативного управления производством, находится целый класс жизненно важных для машиностроительного предприятия производственных БП, создающих прибавочную стоимость продукции и оказывающих значимое влияние на эффективность работы предприятия в целом.

По оценкам аналитических компаний IDC и Gartner Group [6], начиная с 2006 года происходит постоянное снижение объема рынка внедрения ERP-систем на отечественных и зарубежных машиностроительных предприятиях. Подтверждением этой тенденции является тот факт, что, начиная с 2008 года, к разработке ИАИС класса PLM-систем приступили ведущие ИТ-компании, разрабатывающие ERP-системы: SAP, Oracle Corporation.

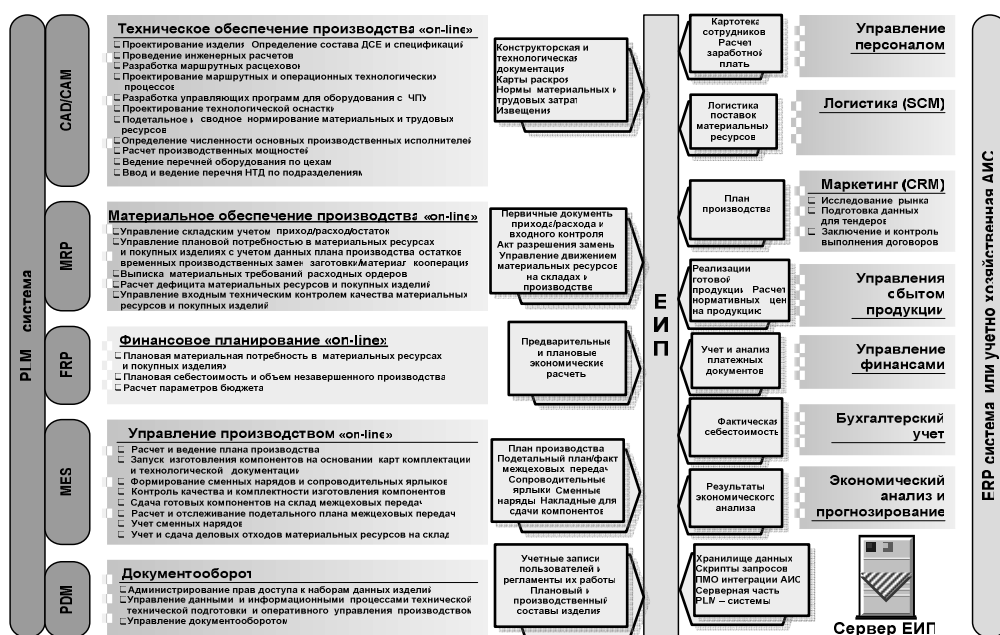


Рис. 4. Предлагаемая структура ИАИС класса PLM-системы

Изучение возможностей отечественных и зарубежных ИАИС класса PLM-систем, показало, что в них реализована интеграция в ЕИП машиностроительного предприятия САД/САМ/САЕ/PDM-систем, т. е. БП конструкторской и технологической подготовки производства (рис. 3) [2, 3].

## 2. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРУКТУРЫ ИАИС КЛАССА PLM-СИСТЕМЫ

Анализ результатов внедрения ИАИС позволил разработать базовые технологии структуры ИАИС класса PLM-системы для решения задачи комплексной автоматизации в ЕИП машиностроительного предприятия БП технической подготовки и оперативного управления дискретным производством.

Для реализации структуры ИАИС класса PLM-системы предложены три группы базовых технологий [2, 3, 7]: реинжиниринга БП – последовательное, непрерывное изменение и совершенствование БП проектирования, производства и эксплуатации изделия; представления данных изделия в виде единой информационной модели ИАИС класса PLM-системы; управления данными электронного состава наукоемкого изделия (ЭСНИ) – функции управления БП стадий ЖЦИ, хранение данных и документов, конфигурация и классификация изделий, методы интеграции PLM и ERP-систем (учетно-хозяйственной АИС).

### 2.1. Технология реинжиниринга БП

Для реализации технологии реинжиниринга БП предлагается следующая последовательность действий [2, 7]:

- исследование БП предприятия, обоснование предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы;
- обоснование выбора платформы (методологии) управления жизненным циклом проекта (ЖЦП) ИАИС;
- разработка функциональной модели (ФМ) ИАИС класса PLM-системы.

**Исследование БП предприятия, обоснование предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы.** Анализ результатов внедрения ERP-систем на машиностроительных предприятиях, основных тенденций развития концепции ИАИС класса PLM-системы, взаимодействия БП технической подготовки и оперативного управления производством, выявил необходимость интеграции в ЕИП предприятия функций САД, САМ, PDM, FRP, MRP, MES-систем. Реализация функций FRP, MRP, MES-

систем в ERP-системе (учетно-хозяйственной АИС) приводит к следующим последствиям [2, 3, 7]: не возможна реализация параллельных БП технической подготовки и оперативного управления производством; отсутствуют процедуры администрирования и одновременного доступа пользователей к набору данных ЭСНИ на стадиях ЖЦИ; для актуализации набора данных ЭСНИ на стадиях ЖЦИ необходимы многочисленные рутинные процедуры синхронизации и контроля (проверки) записей структурированных файлов обмена, как следствие – многочисленные ошибки и потеря доверия пользователей к возможностям ИАИС; исключается интеграция с системами реального времени SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition); ограничения возможностей масштабируемости структуры ИАИС; увеличение сроков, стоимости внедрения и сопровождения.

На основании результатов вышеуказанных исследований, разработана новая структура ИАИС класса PLM-системы, представленная на рис. 4 [2, 3, 7]. Обоснованием предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы, прежде всего, является необходимость реализации оперативного взаимодействия в ЕИП машиностроительного предприятия функций САД/САМ/САЕ/PDM/FRP/MRP/MES-систем, включая программное взаимодействие с ERP-системой (учетно-хозяйственной АИС).

**Обоснование выбора платформы управления ЖЦП ИАИС.** Согласно статистическим данным, собранным аналитической компанией Standish Group (США), из 30000 проектов АИС, обследованных в США в период 1994 по 2009 г., успешными оказались не более 24% проектов (были выполнены в срок и в рамках заданного объема финансирования). Анализ показал, что большинство неудач было связано с отсутствием или неправильным применением методологии проектирования АИС, отвечающих требованиям предприятий. Методология ЖЦП ИАИС класса PLM-системы, основанная на системном подходе, является наиболее важным стратегическим фактором для успешного создания и внедрения проекта ИАИС машиностроительного предприятия.

При выборе платформы ЖЦП ИАИС, прежде всего, учитывались следующие характеристики создаваемого проекта: уровень качества по стандарту CMM (Capability Maturity Model)/CMMI (Capability Maturity Model Integration); область применения (наукоемкие проекты ИАИС или бизнес-приложения); методы разработки (итеративные и каскадные); возможность распределенной работы и администрирования прав уча-

стников; документированность; возможность управления требованиями; масштабируемость; организация и стоимость тестирования; стоимость внедрения и сопровождения. На основании сравнения вышеуказанных характеристик платформ ЖЦП для разработки проекта ИАИС класса PLM-системы выбрана методология RUP (Rational Unified Process).

**Обоснование технологии создания проекта структуры ИАИС.** Выбор CASE (Computer Aided Software Engineering)-технологии основывался на следующих ее возможностях: повышение качества создаваемого программно-математического обеспечения (ПМО) ИАИС за счет применения графических средств моделирования предметной области, формирования и контроля исходного кода, снижение времени создания проекта, что позволяет на ранних стадиях проектирования получить прототип будущей ИАИС и оценить его.

Обоснование метода проектирования ФМ проекта структуры ИАИС. Объектно-ориентированный (ОО) метод проектирования ФМ был выбран на основании следующих его возможностей: реализация структурной декомпозиции

БП предприятия; моделирование динамического поведения ИАИС в зависимости от возникающих в ней событий. ОО ФМ ИАИС рассматривается как совокупность взаимодействующих во времени объектов. Проектирование ОО ФМ ИАИС осуществляется по направлению от модели общего представления функциональности к модели динамического взаимодействия объектов системы, на основе которой формируются классы объектов в интегрированной среде разработки ПМО.

Для ОО проектирования ФМ ИАИС обоснован выбор унифицированного языка моделирования UML (Unified Modeling Language) [8]. Использование языка UML позволяет реализовать принцип разработки ФМ в качестве самостоятельного и обязательного приложения, определяющего состав, структуру и динамическое поведение будущего ПМО PLM-системы (объекты, свойства, методы, связи). При этом подробное описание ФМ создается не на языке программирования, а посредством платформенно-независимого ОО языка визуального моделирования UML.

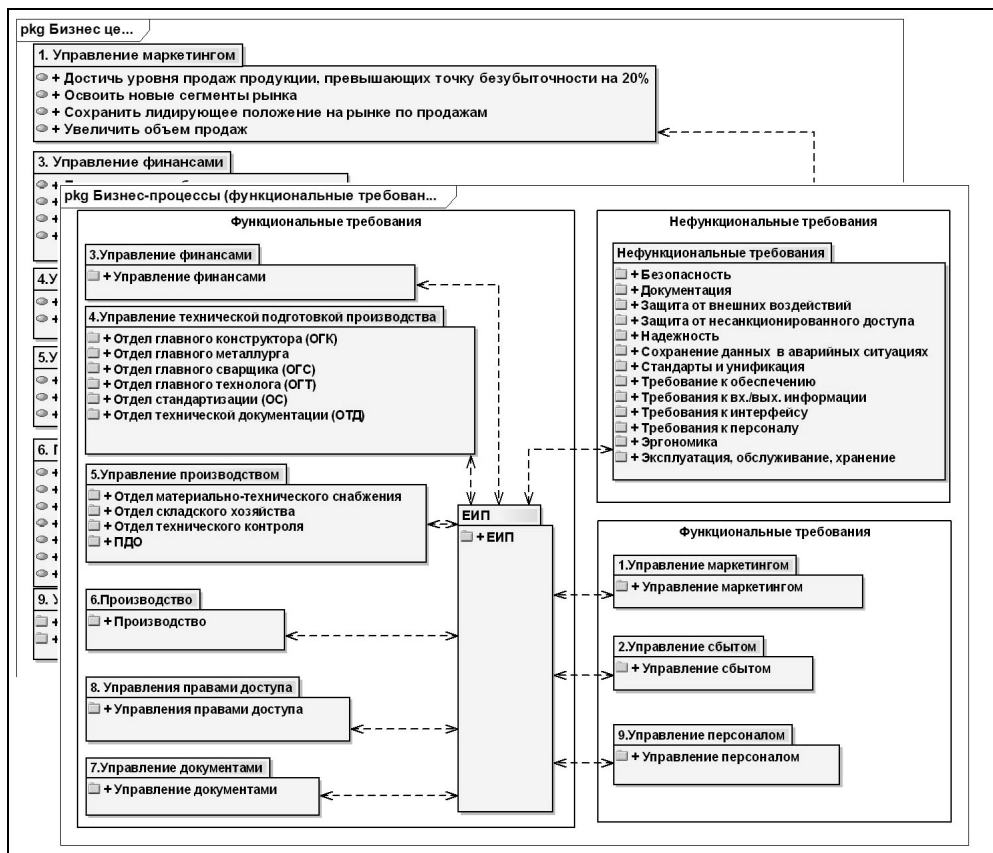


Рис. 5. Диаграммы бизнес-целей и БП 1-го уровня ФМ ИАИС

**Разработка ФМ ИАИС класса PLM-системы.** Этапы разработки ОО ФМ: бизнес-моделирование; определение требований; анализ и проектирование; реализация; тестирование; развертывание. Каждый этап включал выполнение задач для достижения конечной цели функционального моделирования – разработка ПМО предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы [7].

**Бизнес-моделирование.** На этапе бизнес-моделирования (Business Modeling) ФМ PLM-системы решены следующие задачи [7]:

- определены бизнес-цели предприятия. В предполагаемой структуре ИАИС реализована реструктуризация бизнес-целей машиностроительного предприятия (рис. 5);

- описаны БП предприятия. Данная задача решалась для формирования единого понимания БП предлагаемой структуры ИАИС разработчиком и сотрудниками предприятия. Для этого ФМ БП спроектирована как иерархия диаграмм. Например, диаграмма пакетов «4. Управление технической подготовкой производства» является ФМ БП 1-го уровня (см. рис. 5). На самом последнем уровне иерархии ФМ на диаграмме прецедентов (use case diagram) размещаются собственно БП и связанные с ними бизнес-роли, работники, классы, сущности (рис. 6);

- установлены требования. Одна из важнейших задач этапа бизнес-моделирования – определение функциональных и нефункциональных требований (requirements) к ФМ ИАИС.

- определены бизнес-объекты структуры ИАИС: бизнес-работники, бизнес-роли, сущности, классы (рис. 6).

**Определение требований.** На данном этапе реализованы функциональные и нефункциональные требования в виде ПМО ФМ предлагаемой структуры ИАИС. Для реализации перехода от этапа бизнес-моделирования к ПМО в ФМ прецедентов (use case model) разработаны следующие диаграммы:

- прецедентов (use case diagram) – функции ИАИС при работе с сущностями и видами деятельности (activity diagram) – формы интерфейса, последовательность реализации бизнес-логики и сущности (рис.7);

- динамического взаимодействия объектов каждого прецедента в виде графа (sequence diagram) и в табличной форме (collaboration diagram) (рис. 8).

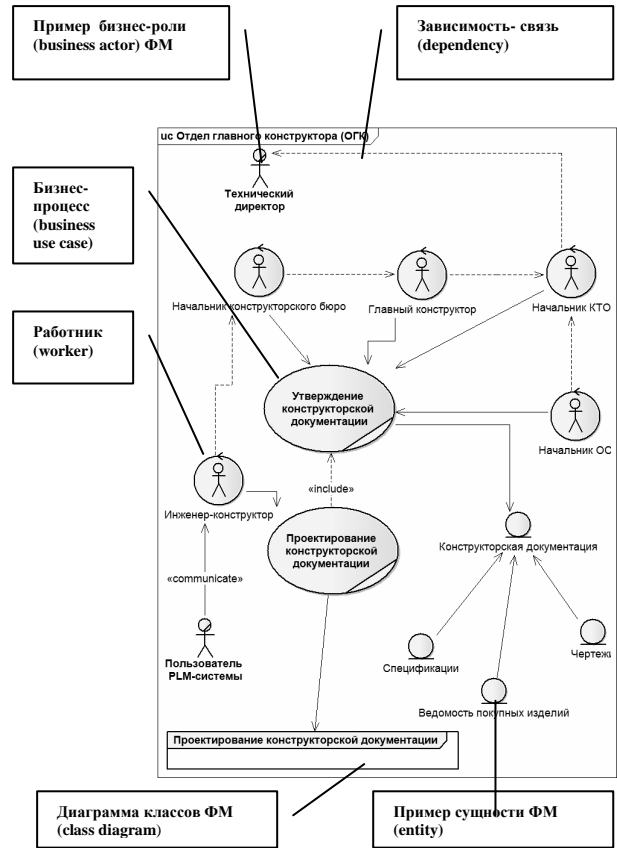


Рис. 6. Пример диаграммы прецедентов

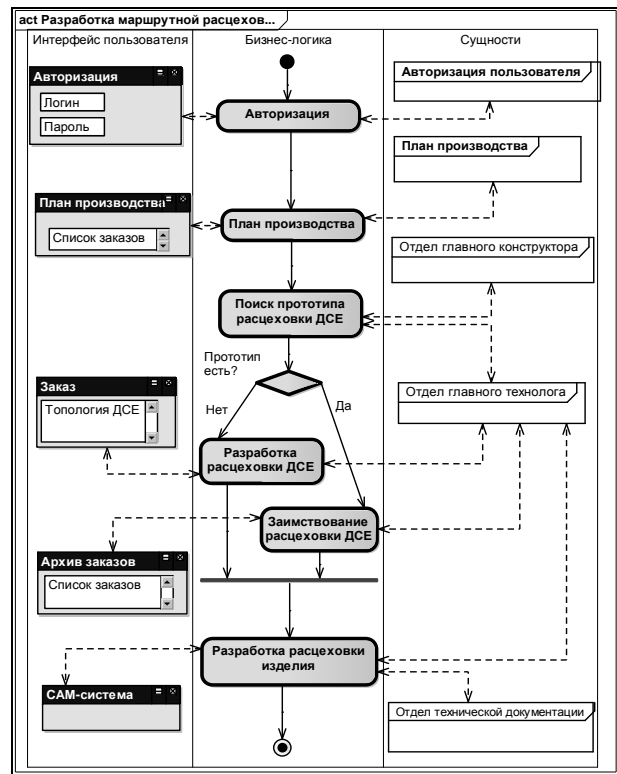


Рис. 7. Пример диаграммы деятельности

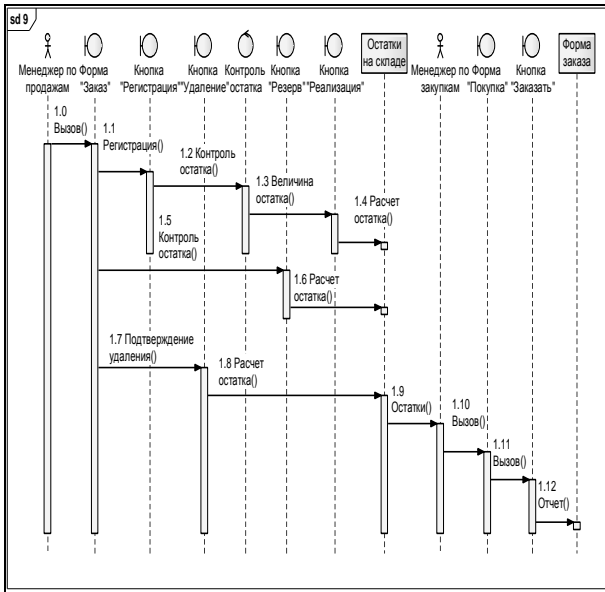


Рис. 8. Пример диаграммы взаимодействия

**Анализ и проектирование.** На этом этапе разработана логическая и физическая модель данных структуры ИАИС. Целью разработки модели данных является отображение классов, которые реализуют функциональные и нефункциональные требования к ИАИС. Модель данных ИАИС 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. Пример представления связей диаграммы класса «Отдел главного конструктора», с указанием ссылок на подчиненные диаграммы классов, например, «Типы данных» и «Управления правами доступа», приведен на рис. 9.

**Реализация.** Алгоритм реализации проекта АИС включает формирование кодов программы классов объекта, программирование процедур методов классов объектов, наполнение БД. Для автоматизации процесса формирования классов объектов использовались разработанные диаграммы классов. Формирование шаблонов процедур методов классов объектов производилось на основе диаграмм взаимодействия объектов. Программирование процедур методов класса объектов осуществлялось на основе шаблонов процедур методов классов объектов по спецификациям диаграмм деятельности и состояний объектов. Предложенный алгоритм реализации осуществлен на основе диаграммы компонентов (component diagram).

**Тестирование.** Цель этапа – обнаружение, локализация и устранение дефектов в ПМО и

данных. Для этого использовалась ФМ тестирования (test suite).

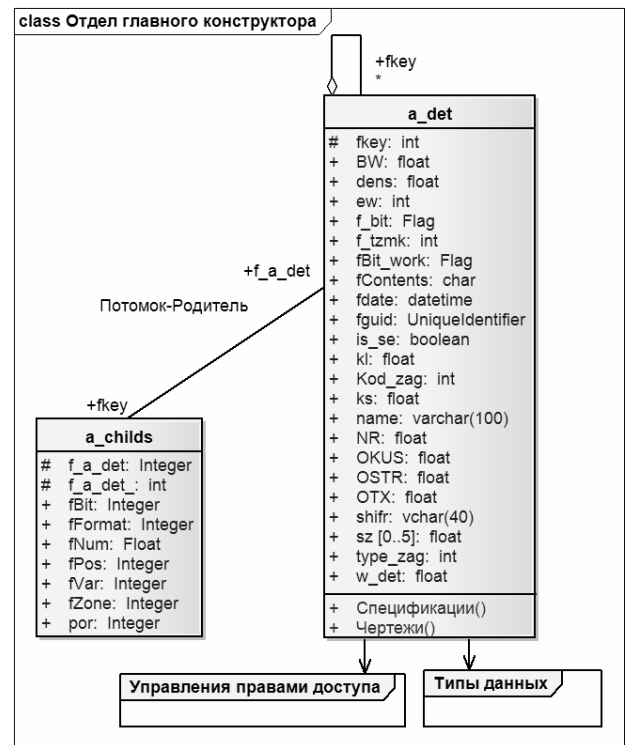


Рис. 9. Пример диаграммы классов ФМ

**Развертывание.** Цель данного этапа – функциональное моделирование ИАИС с точки зрения механизма доступа к данным, конфигурации узлов, где производится обработка информации, размещение компонентов на каждом узле. Функциональное моделирование осуществлялось с помощью диаграммы развертывания (deployment diagram), которые предназначены для визуализации, специфицирования, документирования и управления ИАИС.

Разработанная ОО ФМ является основой для создания единой информационной модели предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы.

## 2.2. Технология представления данных изделия в виде единой информационной модели (ИМ) ИАИС

Интенсивный рост объемов информации, переработка которых необходима для обеспечения стадий ЖЦИ, требует использования новых форм и технологий представления данных об изделиях.

Одна из ключевых задач при создании единой ИМ ИАИС класса PLM-системы – разработка технологии представления древовидных структур ЭСНИ. В работе [2] выполнен анализ возможностей четырех основных техно-

логий представления древовидных структур применяемых в реляционной БД: в виде матрицы смежности; с помощью таблицы связей; в виде таблицы узлов и составных путей; на основе интервального дерева. Результаты сравнительного анализа показали, что рассмотренные технологии представления древовидных структур обладают различным сочетанием положительных и отрицательных основных характеристик: возможность описания множества иерархических представлений и максимальное количество уровней в них; размер и общее количество записей; производительность запросов выборки, редактирования набора данных; поддержка целостности данных; размер, занимаемый данными на диске; требования к ресурсам ЭВМ.

Предложенная технология древовидного представления данных основана на разработанной ОО ФМ ИАИС класса PLM-системы и реализована в виде единой ИМ, которая удовлетворяет следующим основным требованиям [2]:

- структура: максимальное количество уровней – не менее 50; общее количество записей – нет существенных ограничений; формирование осуществляется по событию в ИАИС; построение множества альтернативных деревьев, описывающих иерархические представления предметной области ИАИС;

- реализация: вхождение узла в разные уровни иерархического представления с различным значением количественного параметра; ассоциативная связь атрибутов дочернего узла с атрибутами родительского узла; различное сочетание атрибутов узла (например, компонента и ее возможные варианты маршрутных расцеховок изготовления);

- высокая производительность операций: определения количества всех потомков узла; навигации и корректирования поддерева; прямой выборки всех потомков узла, поддерева, пути от узла до корня дерева (всех предков узла); выбора узла (например, изделие, компонента, маршрутная расцеховка, документы и т. п.), удовлетворяющего условиям отбора с группированием отобранных записей по изделию, компоненте, маршрутной расцеховке, подразделению, виду работы и другим данным;

На рис. 10 приведена единая ИМ предлагаемой ИАИС класса PLM-системы [2]. Сплошные линии соответствуют связям, представленным в таблицах схемы данных ИМ

ИАИС. Пунктирными линиями обозначены связи, которые являются ограничениями внешнего ключа в схеме данных ИМ. В ИМ выделены следующие иерархические представления: компонентов изделий (узлов):  $U1...U3$ ; топологии вхождения компонентов и их наборы данных:  $K1...K4$ ; маршрутных расцеховок изготовления компонентов изделий:  $P1...P3$ ; уровней взаимодействия наборов данных на стадиях ЖЦИ  $L1...L[N]$ .

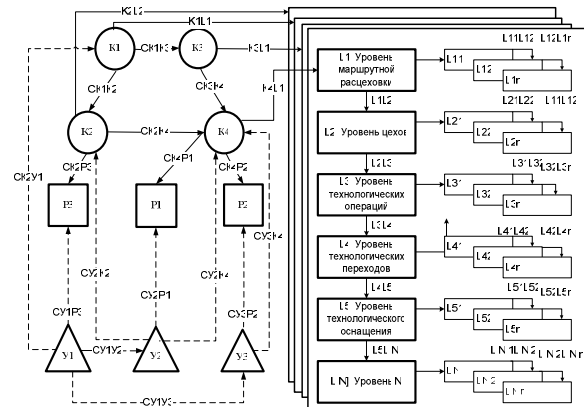


Рис. 10. Единая ИМ предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы

Пример программной реализации технологии представления данных изделия в ИАИС Stalker PLM показан на рис. 11 [2, 3, 7].

### 2.3. Технология управления данными ЭСНИ

Для реализации базовой технологии управления данными об изделии разработано ПМО системы Stalker PDM. Основные функции системы Stalker PDM [2, 3, 7]: администрирование прав доступа к наборам данных ЭСНИ; управление составом изделий и классификация деталей-сборочных единиц (ДСЕ); управления деловыми (информационными) процессами, связанными с ЭСНИ.

Новой функцией, реализованной в системе Stalker PDM, является возможность управления конфигурацией планового и производственного ЭСНИ. Реализация данной функции связана с активным развитием на машиностроительных предприятиях тенденции увеличения количества временных производственных замен: изменение маршрута изготовления ДСЕ изделия; изменение заготовки или материала ДСЕ изделия; использования кооперации при изготовлении ДСЕ изделий и т. п.





### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методология проектирования ИАИС класса PLM-системы машиностроительного предприятия, основанная на интеграции общенаучных подходов, системных принципов и общих закономерностей построения, планирования, функционирования, развития сложных многоуровневых систем, что позволяет рассматривать процесс проектирования как единую динамическую систему взаимодействия БП технической подготовки и оперативного управления дискретным производством.

2. Разработана структура ИАИС класса PLM-системы, позволившая объединить в ЕИП машиностроительного предприятия БП технической подготовки и оперативного управления дискретным производством. В ФМ предложенной структуры системы на основе использования объектно-ориентированных методов CASE-технологий и платформенно-независимого унифицированного языка моделирования UML, реализован принцип создания ФМ в качестве самостоятельного и обязательного приложения, определяющего состав, структуру и динамическое поведение будущего ПМО системы (объекты, свойства, методы, связи).

3. Разработана базовая технология представления данных наукоемкого изделия в виде единой ИМ предлагаемой структуры ИАИС класса PLM-системы, которая позволила описать множества иерархических представлений объектов предметной области, повысить производительность выполнения запросов к наборам данных на стадиях ЖЦИ.

4. Разработана базовая технология управления данными ЭСНИ в предлагаемой структуре ИАИС класса PLM-системы, которая позволила в ЕИП машиностроительного предприятия реализовать функции управления БП ЖЦИ, хранения данных и документов, конфигурацией и классификацией изделий, методами интеграции PLM и ERP-систем (учетно-хозяйственной АИС).

5. Разработано ПМО ИАИС Stalker PLM, реализующее в ЕИП машиностроительного предприятия комплексную автоматизацию функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем [2, 3, 7].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller E. L. Enterprise Resource Planning. The changing application model // Gartner Group. Feb. 5. 1996. White paper. P. 8.

2. Кульга К. С. Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы. М.: Машиностроение, 2008. 265 с.

3. Кульга К. С. Особенности внедрения на предприятиях и методы интеграции CAD/CAM/PDM/FRP/MRP/MES/PLM и ERP-систем // САПР и графика. М.: 2008. № 3. С. 91–94.

4. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М.: MBM, 2003. 264 с.

5. APICS – The Association for operations management [Электронный ресурс] (<http://www.apics.org>).

6. Gather technology business research insight [Электронный ресурс] (<http://www.gartner.com>).

7. Кульга К. С. Разработка программного обеспечения PLM-системы на основе объектно-ориентированных методов CASE-технологий // САПР и графика. 2009. № 6. С. 91–94.

8. Фаулер М., Скотт К. UML в кратком изложении: Применение стандартного языка объектного моделирования. М.: Мир, 1999.

### ОБ АВТОРЕ



**Кульга Константин Станиславович**, доц. каф. мехатр. станочн. систем. Канд. техн. наук по спец. 05.02.05 (Мостанкин, 1990). Иссл. в обл. мет. автоматизир. проектир. ИАИС класса PLM-систем.