

Поддержка жизненного цикла сложных технических систем: анализ декларативного и императивного подходов к моделированию поведения виртуальных предприятий

© Е.И. Кузин¹, В.Е. Кузин²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ОАО «Силловые Машины», Санкт-Петербург, 195009, Россия

Рассмотрены проблемы реализации бизнес-процессов виртуального предприятия по управлению и поддержке жизненного цикла изделий высокой технической сложности (ПЖЦИ) на базе системы PLM. Проанализированы особенности реальных бизнес-процессов предприятий, обеспечивающих ПЖЦИ. Приведены императивный и декларативный подходы к описанию бизнес-процессов ПЖЦИ и проблемы использования технологии управления потоком работ (Workflow) для их реализации. Предложена методология описания бизнес-системы, в которой описание процессных и структурных свойств осуществляется единообразно на основе формального аппарата логики предикатов первого порядка и лямбда-исчисления.

Ключевые слова: управление поддержкой жизненного цикла изделий, PLM, виртуальное предприятие, управление бизнес-процессами, технологии управления потоком работ (Workflow), декларативный и императивный подходы.

Введение. Предприятия, выпускающие наукоемкую продукцию высокой технической сложности с длительным циклом разработки, производства и эксплуатации, часто переходят от традиционной бизнес-модели, в соответствии с которой предприятие продает свою продукцию конечному потребителю, к сервис-ориентированной бизнес-модели, предполагающей продажу бесперебойного «функционирования изделия» конечному потребителю. Реализация такой бизнес-модели требует создания системы поддержки жизненного цикла изделий (ПЖЦИ), обеспечивающей управление стоимостью ЖЦИ [1, 2].

В создании, эксплуатации и ремонте наукоемкой продукции принимает участие множество больших и малых предприятий, объединенных в виртуальное предприятие (ВП) [1], представляющее собой сложную, динамичную, открытую бизнес-систему, объединяющую юридически независимые предприятия и формирующую единую организационно-технологическую и информационную среду за счет временного объединения ресурсов различных предприятий. Взаимодействие между членами ВП происходит в цифровом режиме. Определяющая роль в поддержании слаженной и эффективной работы ВП, а также в достижении его стратегических целей и решении тактических задач принадлежит информационным технологиям.

Управление данными в едином информационном пространстве на протяжении всех этапов ЖЦИ, а также управление бизнес-процессами ВП осуществляется системой PLM (Product Lifecycle Management). В настоящее время следует признать, что реальная функциональность систем PLM как интегрированной совокупности автоматизированных систем охватывает лишь этап конструкторско-технологической подготовки производства изделия (далеко не в полной мере). Этап производства изделия, на котором требуется решение задач объемно-календарного и оперативно-календарного планирования, балансировки производственных мощностей, оптимизации поставок материалов и комплектующих, а также складских запасов, поддерживается специализированными информационными системами ERP и MES. Этап эксплуатации, на котором важное значение имеет учет фактических технических характеристик изделия, его технического обслуживания и ремонта, управление надежностью изделия, также требует применения специализированного программного обеспечения, в зависимости от реализуемой методологии эксплуатации и обслуживания изделия [1].

Управление бизнес-процессами с применением современных систем PLM основано на технологии Workflow. В этих системах реализован стандарт управления потоками работ WRM (Workflow Reference Model), разработанный и опубликованный коалицией Workflow Management Coalition в 1995 г. [3]. В основе данного стандарта лежит аппарат сетей Петри, что определяет границы его применения, в частности WRM не позволяет:

- описывать взаимодействие между параллельно выполняющимися процессами;
- создавать иерархические модели процессов;
- описывать обработку исключительных ситуаций (эскалировать проблемы);
- описывать состояния объектов, в которых протекает процесс, а также зависимость хода выполнения процесса от состояний объектов.

Это лишь главные ограничения стандарта WRM. Со времени публикации стандарта прошло уже более 20 лет, был накоплен значительный опыт по описанию и реализации бизнес-процессов, отраженный в стандарте BPMN (Business Process Management Notation) консорциума Object Management Group [4, 5]. В этом стандарте возможности сетей Петри расширены за счет включения грамматических конструкций, позволяющих описывать:

- взаимодействие между параллельно выполняющимися процессами;
- иерархически организованные процессы;
- обработку исключительных ситуаций.

Однако эти дополнительные возможности не вошли ни в одну из поставляемых платформ PLM. Поэтому можно констатировать, что

возможности современных систем PLM по управлению бизнес-процессами остаются на уровне систем конца XX в. Кроме того, даже в последних версиях BPMN возможность описания состояния объектов, участвующих в выполнении процесса, как и возможность установления зависимости хода выполнения процесса от состояний таких объектов, осталась нереализованной.

Таким образом, возможности системы PLM в управлении бизнес-процессами крайне ограничены, а технология Workflow ориентирована только на достаточно простые, строго регламентированные, предопределенные, повторяющиеся бизнес-процессы. Для описания реальных сложных бизнес-процессов ВП возможностей технологии Workflow недостаточно. Характерным примером может быть процесс согласования конструкторской документации, включающий в себя проверку на технологичность. Заранее предопределенная последовательность в этом случае исключена, поскольку в результате замечаний технологов может возникнуть кардинально противоположное конструкторское решение. Число циклов, последовательность действий в цепочках определяются исключительно по ходу реализации процесса. Хотя существуют «контрольные» точки, которые могут служить своеобразными «границами» заданий Workflow. Но такие задания имеют очень высокий уровень (эскизный проект, технический и рабочий проекты).

Поставщики систем PLM утверждают, что созданием исполняемой модели бизнес-процессов могут заниматься непосредственно инженеры и технологи благодаря простоте технологии Workflow, которая предполагает алгоритмическое описание бизнес-процессов в виде диаграмм. При этом построенное в виде диаграмм представление в дальнейшем не требует кодирования и готово к исполнению. Поставщики систем PLM предлагают приобрести библиотеку шаблонов отраслевых решений, в которых обобщен оптимальный опыт создания типовых бизнес-процессов (инженерных, технологических, производственных). Однако проблема состоит в том, что почти готовые (на 90 %) процессы, созданные инженерами, или идеальные процессы «наилучшей практики», в дальнейшем необходимо адаптировать к конкретным реальным условиям с учетом множества деталей. Такая настройка требует для оставшейся работы 90 % времени, необходимого для согласования окончательной версии бизнес-процесса, уточнения конкретных деталей, касающихся данных, дополнительного кодирования для получения требуемой информации от других приложений, используемых на предприятии. Это довольно продолжительная и трудоемкая работа, а полученный в результате бизнес-процесс бывает трудно использовать.

На практике события не происходят строго последовательно, в заранее предопределенном порядке, многие действия выполняются

параллельно, последовательность их меняется, если это допускает логика процесса. Процессы проектирования, технологической подготовки и другие инженерные и производственные процессы имеют сложный нелинейный, итеративный характер, зависят от множества факторов и требуют кропотливого учета различных сценариев развития событий, а не только исключения их из рассмотрения. Учет их факторов с помощью Workflow-диаграммы является непростой задачей.

Реальные общение и взаимодействие в организации значительно отличаются от формального идеального взаимодействия, описываемого Workflow-диаграммами, которое по своей форме устарело и не вписывается в современный «цифровой» мир, где все взаимосвязано. Особенно это касается современного поколения, выросшего на интерактивном общении и взаимодействии. Online-доступ к данным и совместное параллельное взаимодействие являются ключевым элементом новых подходов к описанию бизнес-процессов, в частности в области ПЖЦИ.

Бизнес-процессы виртуального предприятия по ПЖЦИ. Производственные бизнес-процессы часто представляют в виде линейной разветвляющейся структуры, которая логично описывает алгоритм процесса в виде блок-схемы, или с помощью диаграмм, используемых, например, в стандарте BPMN. Результатом такого описания является набор строгих абстрактных процессов, логика которых понятна участвующим в их обсуждении. Однако эти строгие формальные средства не позволяют описывать ряд важных особенностей реальных бизнес-процессов. В таблице представлен пример основных бизнес-процессов ВП для всех этапов ЖЦИ.

Основные бизнес-процессы ВП для всех этапов ЖЦИ

Этап	Бизнес-процесс
Проектирование	Создание базовой контрольной структуры
	Инженерные расчеты: кинематические, прочностные, тепловые и др.
	Автоматическое, ассоциативное 3D-проектирование в контексте с техническими требованиями
Подготовка производства	Проектирование технологического состава с отображенными на нем логистическими контрольными номерами
	Разработка сквозного технологического процесса
	Разработка технологической 3D-модели и эскизов операций
	Автоматизированный расчет норм основных и вспомогательных операций
	Автоматизированный расчет норм трудоемкости

Подготовка производства	Автоматизированное проектирование управляющих программ и постпроцессоров
	Имитационное моделирование производственных процессов
Поставки материалов, комплектующих и производство	Объемное планирование производства
	Оперативно-календарное планирование производства
	Объемное планирование поставок материалов, комплектующих, инструментов и оснастки
	Оперативно-календарное планирование поставок материалов, комплектующих, инструментов и оснастки
	Расчет плановых прямых и общецеховых затрат (по заказам и изделиям)
	Учет выполнения производственных операций (по заданиям/нарядам)
	Учет перемещения материалов, комплектующих, полуфабрикатов
	Учет расхода материалов, комплектующих и деталей
	Учет фактических прямых и общецеховых затрат
	Контроль и анализ выполнения плана производства
Диспетчирование производственных заданий и др.	
Эксплуатация и обслуживание	Техническое обслуживание
	Ремонт (простой, средний, капитальный)
	Мониторинг тактико-технических характеристик и отказов
	Материально-техническое обеспечение ремонтов

Важной особенностью бизнес-процессов ПЖЦИ является постоянное взаимодействие процессов между различными этапами ЖЦИ, т. е. кроссфункциональное взаимодействие: в процессе технологической подготовки и формирования плана закупок возникает необходимость корректировки конструкторской документации, например в случае невозможности поставок запроектированных узлов и материалов. Информация об отказах на этапе эксплуатации влияет на проектирование, технологическую подготовку, поставки материалов и комплектующих, а также на производство. Таким образом, такие кроссфункциональные процессы активно используют и изменяют информацию, имеют итеративный характер. При этом набор и последовательность действий определяются состоянием изделия, производственного оборудования, склада, договорами с поставщиками,

конкретным состоянием предприятия и даже его внешнего окружения, например партнеров.

Создание сложного технического изделия не всегда осуществляется строго последовательно: после завершения проектирования всего изделия начинается процесс его технологической подготовки, а после его завершения — процесс закупки материалов и комплектующих, и только по завершении процесса закупки — производство. Особенностью реальных бизнес-процессов является отсутствие строгой последовательности выполнения всех этапов по отношению ко всему изделию: закупка может начаться вместе с проектированием, производство также может быть запущено на ранних стадиях проработки конструкторской документации, отгрузка начинается по мере появления компонентов головного изделия на складе готовой продукции. Сроки, требования заказчиков, особенности схемы поставок комплектующих, технологические особенности производства, необходимость оптимальной загрузки оборудования и другие факторы часто требуют первоочередного, возможно параллельного, проектирования — производства и даже отгрузки не всего изделия, а только его определенных узлов и деталей. Например, для монтажа турбины на гидроэлектростанции заказчик может составить план отгрузки узлов, связанный с особенностями ее монтажа и сборки на месте. Другими словами, выполнение бизнес-процессов зависит от текущего состояния контракта на поставку изделия, его технологических особенностей, состояния склада, производства и других подразделений предприятия.

Другой важной особенностью реальных производственных процессов является необходимость группирования материалов, комплектующих, деталей и узлов, например на этапах закупки и производства для оптимизации использования ресурсов (закупку и отгрузку целесообразно проводить достаточно крупными партиями, чтобы оптимизировать затраты на транспортировку, а также снизить стоимость закупки за счет объема). Проектирование и технологическая подготовка производства сосредоточены на разработке электронного макета изделия (ЭМИ), после поступления конструкторско-технологической документации в производственные подразделения начинается производственное планирование, в котором могут участвовать другие изделия. При этом необходимо учитывать факторы, связанные с распределением во времени, состоянием складов, состоянием договоров с поставщиками, сроками и партиями поставок и др. Персонал подразделения закупок не обращается к поставщикам с перечнем всех необходимых материалов и комплектующих для всего изделия. На этапе закупок в зависимости от плана производства отдельных деталей и узлов, других изделий, состояния склада и условий поставщиков о минимальных партиях, возможностях финансирования заку-

пок и многих других факторов формируется план закупок на определенный период, группирующий материалы и комплектующие по всем изделиям, входящим в план. То же самое можно сказать и о производстве. Производственный план учитывает загрузку оборудования, возможности поставок материалов и комплектующих, состояние склада, условие совместно обрабатываемых поверхностей и др. Следовательно, при выполнении бизнес-процессов важное значение имеет информация о состоянии всех ресурсов, участвующих в этом процессе, а также о состоянии подразделений: производства, закупок, складов и др.

Таким образом, реальные бизнес-процессы имеют следующие основные особенности:

кроссфункциональный характер — высокая степень взаимодействия между процессами;

гибкость — набор и последовательность действий бизнес-процесса заранее не predetermined, зависят от состояния ресурсов и различных подразделений предприятия;

итеративный характер — при этом число итераций заранее неизвестно, оно определяется состоянием ресурсов и различных подразделений предприятия;

необходимость информационной поддержки — наличие нужной информации у конкретных исполнителей (об ЭМИ, плане закупок и производства, фактическом выполнении планов, загрузке оборудования);

к регламентированным, стабильно повторяющимся бизнес-процессам относится лишь небольшая часть оперативных достаточно простых операционных процессов.

Описание реальных процессов ВП заключается прежде всего в описании состояния предприятия: его ресурсов, подразделений и даже объектов внешней среды, участвующих в сложном взаимодействии участников ВП. Бизнес-процессы должны формироваться динамически из тех действий, которые могут перевести предприятие в требуемое состояние с учетом его состояния в текущий момент. При формировании таких динамических процессов необходимы навигация и информационная поддержка принятия решений. Полученное описание должно обеспечивать формальную проверку его корректности: непротиворечивости и достижения целей.

Преимущества и недостатки декларативного и императивного подходов к формализации процессов виртуального предприятия. Управление бизнес-процессами BPM (Business Process Management) — концепция процессного управления организацией, рассматривающая бизнес-процессы как особые ресурсы предприятия, непрерывно адаптируемые к постоянным изменениям на основе таких принципов, как понятность и прозрачность бизнес-процессов в организации за счет их мо-

делирования с использованием формальных нотаций, программного обеспечения моделирования, имитации, мониторинга и анализа, возможность динамического перестроения моделей бизнес-процессов участниками и средствами программных систем (IT Gloss). В настоящее время существуют два подхода к описанию бизнес-процессов, которые нашли свое выражение в двух стандартах BPMN (Business Process Management Notation) и CMMN (Case Management Model Notation).

Стандарт BPMN, реализующий *императивный подход* (описание бизнес-процесса в виде алгоритма), предназначен для описания регламентированных, повторяющихся бизнес-процессов. Для автоматизации таких бизнес-процессов разработаны и поставляются системы управления BPMS (Business Process Management System). Предполагается, что внедрение систем BPMS должно обеспечить достижение следующих целей:

- скорости — сокращения времени выполнения бизнес-процессов за счет стандартизации регламентации и автоматизации его шагов и введения временных ограничений для их исполнения;
- качества — за счет прозрачности бизнес-процессов для всех участников, регламентации и средств мониторинга, обеспечиваемых соблюдением всех предусмотренных правил;
- управления на основе показателей — выполнение бизнес-процессов может контролироваться через наборы процессных показателей, отражающих затраты на бизнес-процесс, время выполнения и загрузку ресурсов, что облегчает анализ и оптимизацию бизнес-процесса на основе реальных значений показателей.

Однако доля таких регламентированных, повторяющихся бизнес-процессов на производственных предприятиях невелика. Большая часть бизнес-процессов — это сложноструктурированные, гибкие, адаптивные процессы с заранее неизвестной последовательностью действий, зависящей от меняющихся обстоятельств и решения человека относительно конкретной ситуации. Для описания таких бизнес-процессов ACM (Adaptive Case Management) разработан стандарт CMMN, реализующий *декларативный подход*. Если сравнивать эти два подхода, то можно сказать, что подход BPMN предписывает, как надо делать, в то время как подход CMMN описывает, что надо сделать, а способ выполнения динамически выстраивается в процессе выполнения. Другими словами, в центре BPMN-процессов находится предопределенная последовательность действий, а информация представлена в крайне ограниченном виде, в то время как в центре CMMN-процессов находится информация (данные о состоянии различных объектов), а действия выстраиваются динамически в зависимости от информации о ситуации. В реальности регламентированные бизнес-процессы могут включать в себя фрагменты, которые относятся к нерегламентированным процессам, и наоборот.

Декларативный подход обладает несомненными преимуществами перед императивным подходом, поскольку позволяет описывать и регламентированные, и нерегламентированные бизнес-процессы. Однако поскольку это достаточно новый подход, в настоящее время очень мало промышленных систем обеспечивают его реализацию.

При внедрении систем PLM, поддерживающих крайне ограниченные возможности технологии Workflow, возникают проблемы не только с описанием нерегламентированных бизнес-процессов, например процессов согласования, но также и с описанием и реализацией межпроцессного взаимодействия, невозможностью использования иерархического представления сложных процессов и выстраивания адаптивных, динамичных процессов. Значительные проблемы возникают при необходимости модифицирования процесса. С течением времени после ряда модификаций вероятность возникновения ошибок в логике процесса возрастает.

Таким образом, целесообразна разработка системы поддержки гибких, адаптивных, кроссфункциональных бизнес-процессов, которая должна быть интегрирована с системой PLM.

Методология описания бизнес-системы. ВП являются подклассом сложных систем, который в связи с ориентацией на достижение бизнес-целей получил название бизнес-систем (БС). БС создается для достижения целевого состояния, определяемого стратегическими целями. Причем стратегические цели должны быть измеримыми, поэтому часто их выражают с помощью числовых показателей. К таким показателям относятся, например, показатели КРП (Key Performance Indicators) — ключевые показатели эффективности, финансовые и экономические показатели, показатели состояния различных ресурсов (материальных, информационных, людских) и др. Эти показатели имеют иерархическую структуру. На верхнем уровне находятся интегральные показатели: финансовые, экономические, отражающие степень (процент) завершения этапа проекта, готовности наукоемкого изделия, которые затем декомпозируются по временным интервалам и по подразделениям вплоть до терминального уровня. На данном уровне находятся показатели степени завершения конкретных узлов изделия в конкретном представлении — электронном макете, функциональном, конструкторском или технологическом составах изделия или непосредственно степень готовности самого узла, а также состояние используемых ресурсов.

Достижение целей осуществляется в результате выполнения бизнес-процессов, что приводит к их переходу из текущего состояния в новое состояние, т. е. к изменению состояния БС, которое определяется состоянием ее ресурсов: информационных, материальных, людских. Совокупность переходов БС из начального состояния в целевое через заданные промежутки времени образует фактическую траекторию

движения БС в своем пространстве состояний. В свою очередь этим промежуткам времени можно поставить в соответствие промежуточные значения целевых показателей и получить плановую траекторию движения БС. Мониторинг и анализ текущего состояния предприятия, оценку степени его соответствия целевому состоянию и выработку управляющих действий осуществляет система управления БС.

В данной работе для описания БС предлагается использовать в качестве основы онтологический подход ВВВ (Bunge-Wand-Weber), который представляет собой общепризнанную систему понятий, обладающую свойством полноты для построения онтологического описания предметной области [6]. Этот подход часто используется в качестве базового для анализа возможностей различных языков и методов описания бизнес-процессов [7], таких, например, как ЕРС (Event-driven Process Chain) [8], ВРМН [4].

Онтологический подход предлагает для описания четыре группы конструкций:

- сущности (things), их свойства и типы;
- состояния (states), в которых могут находиться сущности, различные типы состояний, пространства состояний (*state space*);
- события (events), типы событий, переходы между состояниями (процессы);
- систему (system), подсистему, структуру системы, композицию и декомпозицию системы.

Поскольку БС рассматривается прежде всего в контексте формализованного описания гибких адаптивных бизнес-процессов, в центре рассмотрения находятся понятия «состояние» и «переход между состояниями».

Переход между состояниями предлагается описывать с помощью бизнес-функций, в основу которых положена функция нотации IDEF(0) [9], которая преобразует входные ресурсы в выходные с использованием механизмов под соответствующим управлением.

Для построения формального описания БС, характеризующейся сложной операционной семантикой, потребовалось расширить это понятие. Прежде всего операционная семантика требует формального разделения обобщающего понятия «механизмы» на следующие категории: бизнес-подсистемы (подразделения), месторасположение, персонал, технические средства. Кроме того, в нотации IDEF0 описания всех компонентов бизнес-функции (ресурсы, механизмы, управление) являются текстовыми, что не позволяет использовать их для построения формального описания БС. Поэтому модель бизнес-функции необходимо расширить за счет включения в нее описания информационной модели перехода между состояниями, представляющей собой семантическую сеть, которая включает в себя все ин-

формационные объекты, участвующие в бизнес-функции, а также их свойства, в том числе вычисляемые.

Следующим принципиальным дополнением бизнес-функции является формальный механизм запуска, остановки, возобновления и завершения (нормального и аварийного) ее исполнения. Этот механизм представляет собой конечный автомат, который определяет условия запуска, остановки, возобновления и завершения выполнения бизнес-функции. В большинстве случаев для построения такого автомата достаточно сформировать условие запуска бизнес-функции (предусловие) и условие успешного завершения выполнения бизнес-функции (постусловие).

Предусловие описывает состояние БС, когда есть все необходимые и достаточные условия для инициации перехода БС в новое состояние, описываемое соответствующей бизнес-функцией.

Постусловие описывает целевое состояние, в которое должна перейти БС в результате выполнения бизнес-функции. Включение в описание бизнес-функции постусловия, по существу являющегося подцелью — компонентом дерева целей (структуры, описывающей декомпозицию стратегических целей), позволяет построить такую БС, которая обеспечит достижение стратегических целей.

Как отмечалось выше, в представление бизнес-функции входит информационная модель перехода между состояниями, описывающая не только семантику ресурсов и целей, но и весь бизнес-контекст, необходимый для принятия решений по корректировке фактической траектории для достижения целей. Для описания бизнес-функций и информационной модели БС предлагается использовать язык предикатов первого порядка (Пролог). Выбор языка Пролог обусловлен необходимостью реализации следующих особенностей объекта моделирования: необходимость в едином аппарате для описания сложной системы (БС); необходимость в формальной автоматической проверке целостности и логической непротиворечивости; простота модификации модели в процессе ее исполнения; простота интеграции с реляционными СУБД корпоративной системы.

В соответствии с онтологическим подходом вся контекстная информация о процессах должна быть представлена в виде семантической сети, описывающей знания о предметной области на основе триплетов OAV (Object-Attribute-Value), а также различных отношений и классов. Базовыми понятиями информационной модели являются: сущность, экземпляр сущности, отношение, класс, простые типы (целые числа, вещественные числа, строки, даты), лямбда-выражение (функция). Эти понятия образуют информационную метамодель БС.

Сущность — понятие, определяющее категорию реально существующих материальных или информационных объектов, характеризующихся наличием одного и того же набора свойств (отношений).

Экземпляр сущности — материальный или информационный объект, у которого заданы значения всех отношений сущности.

Класс — аналог математического множества. Класс состоит из экземпляров одной сущности. Класс может быть задан перечислением, одной из операций над множествами (объединение, пересечение, разность) или с помощью предиката. Свойства сущности или класса определяются отношениями и функциями (лямбда-выражениями).

Отношение — подмножество декартова произведения классов ($RElement_0 \times RElement_1 \times \dots \times RElement_n$, где $0, 1, \dots, n$ — значения атрибута `domainIndex`).

В метамодели представлены только направленные отношения. В зависимости от «направления» отношения свойства класса подразделяют на прямые (в которых он фигурирует в декартовом произведении на первом месте) и обратные (во всех случаях, когда класс в декартовом произведении фигурирует на позициях с индексом больше единицы). Отношения могут быть явно задаваемыми и вычисляемыми.

Явно задаваемое отношение — подмножество декартова произведения классов, определяемое перечислением элементов этого подмножества.

Вычисляемое отношение — логическое высказывание, определяющее истинность принадлежности элемента декартова произведения классов подмножеству, соответствующему определяемому отношению.

Функция — отображение свойств класса на простые типы: числа, строки, даты. Функция определяется как результат применения других функций с помощью лямбда-выражения, описывающего последовательность их применения и распределение аргументов определяемой функции по применяемым функциям. Такое рекурсивное определение предполагает наличие некоторых «базовых» функций, семантика которых определена изначально. К таким функциям относятся: сумма элементов множества (SUM), количество элементов множества (COUNT), минимальное значение элементов множества (MIN), максимальное значение элементов множества (MAX), среднее значение элементов множества (AVG).

Приведенный список предлагается расширить путем введения «псевдофункций» над доменами отношений. Предположим, имеется отношение R над классами $D1$ и $D2$ ($R(D1, D2)$). Элементами отношения R являются пары вида $r(d1, d2)$, $d1 \in D1, d2 \in D2$. Прямой псевдо-функцией r' будем называть отображение, ставящее в соответствие экземпляру класса $D1$ ($d1 \in D1$) экземпляр класса $D2$ ($d2 \in D2$), если они входят в отношение r : $r'(d1) = d2$. Обратной псевдофункцией r'' будем называть отображение, ставящее в соответствие экземпляру

класса $D2$ ($d_2 \in D2$) экземпляр класса $D1$ ($d_1 \in D1$), если они входят в отношение r : $r''(d_2) = d_1$.

Пример. Пусть имеются классы «Спецификация» S и «Пункт спецификации» SI . Пусть также между этими классами определено отношение $R1$ (S, SI), а у класса «Пункт спецификации» определены отношения «Количество пункта спецификации» $Q(SI, N)$ и «Вес одного элемента» $W(SI, N)$. Тогда для класса «Спецификация» можно определить свойство — функцию «Вес пунктов спецификации»: $W(S) :- \text{SUM}(W'(R1'(S)))$. В данном выражении прямая псевдофункция $R1'(S)$ возвращает пункты спецификации, а прямая псевдофункция $W'(SI)$ — вес одного пункта. Результат каскадного применения псевдофункций суммируется функцией SUM .

Генеральным состоянием экземпляра сущности в момент времени t будем считать совокупность значений его свойств (вектор свойств) в этот момент времени. Пространством состояний экземпляра сущности является множество допустимых сочетаний его свойств или множество его векторов свойств. Количество свойств сущности может быть достаточно велико, что неизбежно приведет к трудностям при анализе и мониторинге состояния ее экземпляров. Поэтому для сокращения параметров состояния экземпляра сущности для нее предлагается определить свойства, уменьшающие размерность вектора свойств путем использования агрегирующих функций (суммирования, минимального, максимального и среднего значения и др.). Совокупность таких свойств образует производное состояние экземпляра сущности. Если для сущности определены свойства, «сворачивающие» размерность вектора свойств, пространством состояний экземпляра сущности будем считать множество производных состояний экземпляров сущности. Изменение состояния экземпляра сущности будем называть его движением в своем пространстве состояний. Выбор свойств сущности, «сворачивающих» размерность вектора свойств ее экземпляров, определяет способ управления движением экземпляров сущности в пространстве состояний. Управление движением экземпляров сущности в пространстве состояний реализуется бизнес-процессом, определяющим плановую траекторию движения (плановые состояния экземпляров сущности), осуществляющим учет фактической траектории движения, реализующим мониторинг и анализ отклонений плановой траектории движения от фактической, а также корректировку свойств экземпляров сущности с целью минимизации или устранения выявленных отклонений. Бизнес-процесс управления движением экземпляров сущности в совокупности с его участниками образуют систему управления движением экземпляров сущности в ее пространстве состояний. Если экземпляр сущности имеет структуру (состоит из экземпляров других сущностей), то система управления будет иерархи-

ческой и включает в себя системы управления экземплярами сущностей, входящими в структуру головного экземпляра.

Если применить приведенные выше положения к БС как экземпляру некоторой сущности, то ее описание может быть представлено в следующем виде:

$$BS = \langle G, BF, IM, SS, CS \rangle,$$

где G — структура целей; BF — множество бизнес-функций; IM — информационная модель; SS — пространство состояний БС; CS — система управления движением БС в ее пространстве состояний.

Заключение. Технология Workflow, применяемая для описания бизнес-процессов в современных системах PLM, не обеспечивает реализацию гибких, адаптивных, кроссфункциональных бизнес-процессов с заранее неизвестной последовательностью действий со сложным информационным контекстом, которые характерны для ВП по ПЖЦИ.

Предлагаемая методология описания БС характеризуется системным подходом к описанию исполняемой модели гибких, адаптивных и динамичных бизнес-процессов ВП по ПЖЦИ. Единообразно с использованием логики предикатов первого порядка и лямбда-исчисления описываются как структурные свойства БС, так и ее поведение, т. е. в одной модели представлены статические и динамические свойства БС. Это способствует восприятию БС как единого целого на всех уровнях ее детализации.

Формальный аппарат логики предикатов первого порядка дает возможность автоматически проверить не только корректность разработанной модели бизнес-процессов, но также достижимость описанных целей.

Использование языка Пролог позволяет построить исполняемую модель бизнес-процессов, что значительно увеличивает практическую ценность предлагаемой методологии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузин Е.И., Кузин В.Е. Управление жизненным циклом сложных технических систем: история развития, современное состояние и внедрение на машиностроительном предприятии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1457.html> (дата обращения 20.04.2016).
- [2] Кузин Е.И., Кузин В.Е. Создание интегрированной системы поддержки жизненного цикла изделия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1458.html> (дата обращения 20.04.2016).
- [3] *Workflow Reference Model Diagram*. URL: <http://www.e-workflow.org/standards/>
- [4] *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Version 2.0.2. URL: <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2/>

- [5] White S.A., Miers D. *BPMN Modeling and Reference Guide*. Future Strategies Inc., 2008, 19 p.
- [6] Wand Y., Weber R. On the Ontological Expressiveness of Information Systems Analysis and Design Grammars. *Journal of Information Systems*, 1993, 3, pp. 217–237.
- [7] Rosemann M., Green P., Indulska M., Recker J.C. Using Ontology for the Representational Analysis of Process Modelling Techniques. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 2009, 4 (4), pp. 251–265.
- [8] Шееп А.В. *ARIS-моделирование бизнес-процессов*. Москва, Вильямс, 2009, 224 с.
- [9] Окулесский В.А. *Функциональное моделирование – методологическая основа реализации процессного подхода*. Москва, НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2001, 247 с.

Статья поступила в редакцию 16.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кузин Е.И., Кузин В.Е. Поддержка жизненного цикла сложных технических систем: анализ декларативного и императивного подходов к моделированию поведения виртуальных предприятий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 5 (53). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1499>

Кузин Евгений Иванович родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 публикаций. Область научных интересов: управление сложными техническими объектами, CALS-технологии.
e-mail: evgeny.cuzin@yandex.ru

Кузин Вадим Евгеньевич родился в 1973 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 г. АО «Силовые Машины». Автор семи публикаций. Область научных интересов: управление сложными системами, имитационное моделирование, управление бизнес-процессами.

Support of the complex engineering system productive life: analysis of the declarative and imperative approaches to virtual enterprise behaviour modeling

© E.I. Kuzin¹, V.E. Kuzin²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Joint-stock Company Power Machines, St. Petersburg, 195009, Russia

The article considers problems of business process realization for a virtual enterprise of the control and productive life support for high complicacy high-tech products on the base of PLM. We give an analysis of the enterprise real business process peculiarities providing the productive life support. Moreover, we consider the imperative and declarative approaches to productive life support business process description and problems of using the workflow technology control for their realization. The article proposes a business system description methodology. The last one includes process and structure characteristics description in the unified way on the base of the formal logic tools of the first order predicates and the calculus lambda.

Keywords: *productive life support control, PLM, virtual enterprise, business process control, workflow control technology, imperative and declarative approaches.*

REFERENCES

- [1] Kuzin E.I., Kuzin V.E. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation, 2016, no. 1.
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1457
- [2] Kuzin E.I., Kuzin V.E. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation, 2016, no. 2.
DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1458
- [3] *Workflow Reference Model Diagram*. Available at:
<http://www.e-workflow.org/standards/>
- [4] *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Version 2.0.2. Available at:
<http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2/>
- [5] White S.A., Miers D. *BPMN Modeling and Reference Guide*. Future Strategies Inc., 2008. 19 p.
- [6] Wand Y., Weber R. *Journal of Information Systems*, 1993, no. 3, pp. 217–237.
- [7] Rosemann M., Green P., Indulskaja M., Recker J. C. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 2009, no. 4(4), pp. 251–265.
- [8] Sheyer A.-V. *ARIS-modelirovaniye biznes-protsessov* [Business process ARIS-modeling]. Moscow, Vilyams Publ., 2009, 224 p. [in Russ.]
- [9] Okuleskiy V.A. *Funktionalnoye modelirovaniye – metodologicheskaya osnova realizatsii protsessnogo podkhoda* [Functional modeling – methodology basis of the process approach realization]. Moscow, NITS CALS-tehnologiy Prikladnaya Lingvistika, 2001, 247 p.

Kuzin E.I. (b. 1946) graduated from Moscow State University in 1970. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications. The scientific interests include complex engineering products control, CALS-technology.
e-mail: evgeny.cuzin@yandex.ru

Kuzin V.E. (b. 1973) graduated from Moscow State University in 1995, works at Joint-stock Company Power Machines. Author of the 7 publications. The scientific interests include complex systems control, simulation modeling, business process control.