

УДК 005.5

ПРОБЛЕМАТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Г. Н. Калянов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

✉ kalyanov@ipu.ru

Аннотация. Анализируется современное состояние теории бизнес-процессов, выделяются ее основные разделы. По каждому из разделов приводится краткий обзор его основных моделей и методов, выявляются пробелы и недостатки, формулируются базовые направления их развития. Среди основных направлений развития теории выделены следующие: переход от языков моделирования бизнес-процессов к языкам моделирования предприятий, разработка и развитие формальных языков моделирования, разработка и исследование методов формального описания синтаксиса и семантики языков моделирования, стандартизация и унификация языков моделирования. Предлагается адаптация части методов и моделей рассматриваемой теории в сторону их ориентации на общую теорию процессов деятельности, обеспечивающую систематизированный базис для решения таких задач, как моделирование процессов, инжиниринг и реинжиниринг процессов, анализ и верификация процессов, автоматизация процессов и др.

Ключевые слова: модель бизнес-процесса, визуальный язык, семантика, прагматика, инжиниринг процесса, верификация, параллелизм.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «бизнес-процесс» (БП) был введен в начале 1990-х гг. М. Хаммером и Дж. Чампи и получил широкое распространение после публикации монографии [1], посвященной новому подходу к реорганизации БП – реинжинирингу бизнес-процессов. Данное авторами определение БП, неоднократно модифицировавшееся в дальнейшем, но не менявшееся по своему содержанию [2, 3], фактически с момента его введения вызывало ряд вопросов у специалистов, обычно обозначавших этим термином традиционный организационно-управляющий процесс. В этой связи в рамках данной работы определим БП как последовательность состояний объекта и функций, обеспечивающих переходы между этими состояниями, в ходе выполнения которой потребляются определенные ресурсы и создается вещественный или нематериальный результат – продукт человеческого труда (предмет, услуга, научное открытие, идея и т. д.).

Кроме того, необходимость и востребованность формализации рассматриваемой области знаний

давно обозначена соответствующим сообществом специалистов, включая и представителей предприятий, что и обусловило создание соответствующей теории бизнес-процессов как формы достоверного научного знания об исследуемом объекте [4]. Отметим, что формальный аппарат, лежащий в основе теории БП, во многом коррелирует с аппаратом теории вычислительных процессов и базируется на следующих направлениях теории программирования: формальные грамматики и языки; теория и методы тестирования, верификации, анализа, оптимизации и оценки качества программного обеспечения (ПО); теория зависимости по данным; теория баз данных и баз знаний; параллельные процессы и методы распараллеливания; структурные и объектно-ориентированные методы анализа и проектирования и др.

В статье рассматриваются состояние и перспективы следующих разделов (направлений) теории БП:

- визуальные языки моделирования БП,
- методы и технологии моделирования БП,
- методы инжиниринга БП,

- методы тестирования, анализа и верификации БП,
- параллельные БП.

1. ВИЗУАЛЬНЫЕ ЯЗЫКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Соответствующий раздел теории БП посвящен прежде всего структурному подходу к моделированию БП. Концептуальная модель визуального структурного языка рассматриваемого класса приведена в монографии [5], она включает четыре базовых компонента – словарь языка, синтаксис языка, комплект абстрактных семантических правил (процедур), аспекты языковой pragmatики.

В рамках структурного подхода используются три вида базовых моделей БП: функциональная, описывающая выполняемые процессом функции; информационная, демонстрирующая отношения между данными; поведенческая, моделирующая поведение процесса (все три могут включать элементы организационно-структурной модели). По типам модели разделяются на статические и динамические (описывающие поведение БП во времени), по уровню формализации – на формализованные и формальные (имеющие математическую основу). Позиционирование наиболее часто применяемых языков визуального моделирования БП в соответствии с их видами, типами и уровнями формализации приведено в табл. 2. Расшифровка используемых в тексте статьи аббревиатур приведена в табл. 1. Отметим, что каждая из перечисленных в табл. 2 нотаций подробно представлена в обзорной части монографии [4].

Задача формализации синтаксиса визуальных языков моделирования БП не вызывает особых

трудностей; в частности, в качестве примеров исследования синтаксиса DFD-диаграмм можно привести работы [6, 7], а синтаксиса ERD-диаграмм – работу [8].

Особенно много внимания посвящено вопросам создания и развитию соответствующих грамматик для визуальных языков моделирования. В частности, в работах [6, 8, 9] предлагаются различные виды грамматик, варьируемых от контекстно-зависимых до автоматных и различающихся по типу используемых символов (графовые грамматики, смешанные грамматики, модифицированные традиционные грамматики, например, RV-грамматики). Все они в зависимости от решаемой целевой задачи разбиваются на распознавающие и порождающие.

Таблица 1

Используемые аббревиатуры

Аббревиатура	Расшифровка
BPMN	Business Process Modeling Notation
CFD	Control Flow Diagram
CMM	Capability Maturity Model
CMMI	Capability Maturity Model Integration
DFD	Data Flow Diagram
ePC	Event-driven Process Chain
ERD	Entity Relationship Diagram
IDEF	Integrated computer automated manufacturing DEFinition
IE	Information Engineering
RV-грамматика	Автоматная графическая грамматика
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SE	Software Engineering
STD	State Transition Diagram
VDM	Vienna Description Method
UML	Unified Modelling Language

Таблица 2

Характеристики языков визуального моделирования бизнес-процессов

Нотация языка	Функции	Данные	Поведение	Организационная структура	Тип	Формализация
DFD	+	-:+	-	-:+	Статический	Формализованная
CFD	+	-:+	+	-:+	Статический	Формализованная
SADT/IDEF0	+	-	-	-:+	Статический	Формализованная
ERD, IDEF1X	-	+	-	-	Статический	Формальная
Структурограммы	-	+	-	-	Статический	Формализованная
STD	-	-	+	-	Динамический	Формальная
BPMN	-:+	-	+	+	Динамический	Формализованная
ePC, IDEF3	+	-	-	-:+	Статический	Формализованная
Сети Петри, IDEF2	-	-	+	-	Динамический	Формальная
Смешанные графы	+	+	+	+	Статический	Формальная
Структурные карты	+	-:+	-	-	Статический	Формализованная

ющие, первые служат для установления принадлежности модели конкретному языку (ее синтаксической корректности), вторые – для построения правильных моделей, принадлежащих данному языку.

Исследованиям в области формализации семантики тоже посвящено значительное число работ, однако практически все они также ориентированы на DFD-диаграммы. В обзоре [10] предложена классификация методов формализации семантики DFD-диаграмм, в которой в качестве основания взят тип языка описания семантики. В соответствии с ней все методы описания семантики подразделяются по стандартным языкам формализации (к которым относится прежде всего Венский метод описания семантики VDM [11]), нестандартным языкам (как правило, разработанным для решения конкретной задачи, связанной с описанием семантики) и метаязыкам. Характеристики наиболее известных из таких методов приведены в табл. 3.

Один из методов формализации, характеризующий представленные в табл. 3 методы, предложен в статье [12]. Он определяет формальную семантику DFD-диаграмм на основе абстрактной модели преобразований потоков данных. При этом семантика определяется через набор функций VDM, преобразующих абстрактное синтаксически корректное представление DFD в абстрактное синтаксически корректное представление специфика-

ций VDM. Имеется два вида таких преобразований, различающихся моделями потоков данных: в одном случае они моделируются как очереди, во втором – как операции, объединяющие два процесса, связанных потоком данных. Второй подход предпочтителен, поскольку позволяет достигнуть более высокого уровня абстракции преобразования DFD, так как это преобразование фокусируется исключительно на моделировании информационных потоков в рамках DFD. При данном подходе процессы преобразуются в VDM-операции. При моделировании внешних сущностей в модели отражаются лишь потоки данных между процессами и внешними сущностями, эти потоки моделируются компонентами состояний VDM-спецификации (в основе VDM лежит теория автоматов, язык оперирует такими понятиями, как состояние, переход, предусловие, постусловие и др.). Хранилища данных также моделируются компонентами состояний VDM-спецификации, это следует из того факта, что процессы, используемые для доступа и модификации хранилищ данных, моделируются VDM-операциями. Наконец, потоки данных (как связи между двумя процессами) моделируются как вызов одной операцией другой операции в зависимости от направления потока данных. Аналогичные модели преобразований применяются большинством методов формализации, разница заключается лишь в используемых языках описания семантики.

Таблица 3

Характеристики методов формализации семантики DFD-диаграмм

Авторы	Язык описания семантики	Нотации	Поддержка иерархии DFD	Расширения DFD	Интеграция нотаций
R.B. France	Алгебраические выражения	DFD, STD, DD	–	+	+
P.D. Bruza, Th.P. van der Weide	Алгебраический язык	DFD	–	+	–
J.A. Serrano, R. Welland	Теория множеств, логика предикатов	DFD, STD, ERD	–	–	+
G.T. Leavens, T. Wahls, A.L. Baker	Спецификации на языке Standart ML	DFD, ERD, DD	+	+	–
M.D. Fraser, K. Kumar, V.K. Vaishnavi	VDM	DFD	–	+	–
P.G. Larsen, N. Plat, H. Toetenel	VDM-SL	DFD, STD, DD	–	+	+
R. Elmstrom, R. Lintulampi, M. Pezze	Сеть Петри	DFD	–	+	–
J.M. Wing, A.M. Zaremski	LSL (LaRCh ShaRED LanGuaGE)	DFD, структурная карта, DD	–	+	+
J. Isaksson, J. Lilius, D. Truscan	Метамодель UML	DFD, STD, DD	–	–	+
J. de Lara, H. Vangheluwe	Графовая грамматика	DFD, структурная карта	–	–	+

Задаче формализации семантики других языков моделирования в настоящее время посвящено незначительное количество работ, что не исключает адаптации перечисленных подходов с целью их ориентации на такие популярные в настоящее время языки визуального моделирования БП как BPMN, IDEF0 и IDEF3.

Связанная с формализацией задача состоит в унификации языков моделирования БП, что обусловлено следующими взаимосвязанными основаниями:

- гармонизация и консолидация многих похожих, но различающихся визуальных языков моделирования, включая похожие нотации (например, нотации Йодана, Гейна – Сарсона, де Марко и др. для диаграмм потоков данных);

- стандартизация форматов обмена моделями между инструментами, реализующими спецификацию языка (графическими редакторами диаграмм, средствами верификации моделей, репозиториями);

- обеспечение общего способа общения («языка для передачи понимания») различными заинтересованными сторонами и для различных применений моделей;

- определение единообразного представления для широкого спектра применений в различных предметных областях;

- обеспечение стандартизированного перехода между этапом моделирования и последующими этапами (реорганизацией БП, автоматизацией БП и т. д.), т. е. между визуальным языком и соответствующим формализованным представлением.

2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Ранние методы визуального моделирования БП были разработаны еще в 1970-х гг. и были ориентированы лишь на решение одной из задач в рамках жизненного цикла – собственно построения моделей. Поскольку им посвящено большое количество работ, включая учебники и монографии практически по каждому из апробированных на практике подходов, в данном обзоре ограничимся лишь представлением их классификации.

Соответствующие методы классифицируются по следующим основаниям:

- по отношению к школам – Software Engineering (SE) и Information Engineering (IE);

- по порядку построения модели – функционально-ориентированные и информационно-ориентированные (или ориентированные на данные);

- по типу целевых систем – для систем реально-го времени (СРВ) и для информационных систем (ИС).

В табл. 4 представлены наиболее часто применяемые методы (отметим, что данные по частоте использования получены на основе анализа информации по 127 программным инструментам, их автоматизирующих, с учетом того, что ряд инструментов поддерживает несколько методов [5]).

Современные технологии моделирования БП разбиваются на два класса – интеграционные и трансляционные [4, 13]. Первые регламентируют объединение моделей различных видов в ком-

Таблица 4

Характеристики методов визуального моделирования бизнес-процессов

Авторы	Язык базовой модели	Частота использования, %	Школа	Порядок построения	Тип целевых систем
E. Yourdon, T. DeMarco	DFD	36,5	SE	Функционально-ориентированный	ИС, СРВ
J. Martin	DFD	22,1	IE	Информационно-ориентированный	ИС
C. Gane, T. Sarson	DFD	20,2	SE	Функционально-ориентированный	ИС, СРВ
L. Constantine	Структурная карта	10,6	SE	Функционально-ориентированный	ИС, СРВ
M.A. Jackson	Структурная карта	7,7	SE	Информационно-ориентированный	ИС, СРВ
K.T. Orr	Скобочная диаграмма	5,8	SE	Информационно-ориентированный	ИС
R.G. Ross	SADT/IDEF0	3,3	IE	Возможны оба варианта	ИС

плексную модель, позволяющую исследовать объект как единое целое с различных позиций, например, его функциональные, информационные и поведенческие аспекты одновременно. Вторые обеспечивают переход от моделей одного вида к моделям другого вида, более точно и адекватно отражающим целевой процесс в рамках его жизненного цикла.

Примерами интеграционных технологий являются:

И1. DFD/CFD-технология [14], интегрирующая диаграммы потоков данных/управления DFD/CFD, дополненные словарями данных (англ. *Data Dictionary*, DD) и спецификациями процессов нижнего уровня (для моделирования функций и функциональных связей процесса); диаграммы «сущность – связь» ERD (для моделирования данных и их взаимосвязей); диаграммы переходов состояний STD (для моделирования поведения процесса). Схема интеграции диаграмм в рамках технологии приведена на рис. 1.

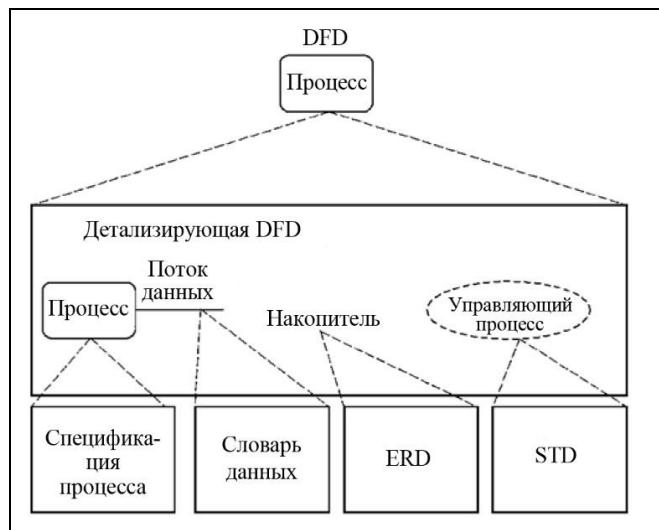


Рис. 1. Схема интеграции моделей в DFD/CFD-технологии

И2. Схема Захмана [15] (модель предприятия), демонстрирующая различные уровни представления архитектуры предприятия, различные виды его обеспечения, а также их основные взаимосвязи. Суть этого подхода сводится к формализованному представлению модели предприятия в виде матрицы. В строках этой матрицы показываются различные представления архитектуры предприятия (перспективы) с использованием различных типов моделей (а именно, контекстуальный уровень, бизнес-уровень, логический уровень, физический уровень, уровень реализации и уровень эксплуатации). По столбцам матрицы разнесены основные виды обеспечения системы, где на каждом уровне

рассматриваются одни и те же категории вопросов (естественно, с различным уровнем детализации), соответствующих строкам таблицы, а именно: цели системы (зачем?), участники (кто?), управляющие события (когда?), используемые данные (что?), функции (как?), места выполнения (где?).

На рис. 2 приведен пример применения подхода Захмана для построения упрощенной модели предприятия (архитектуры), включающей в себя:

- функциональную компоненту (иерархию процессов, функций, операций), где применяются или DFD-диаграммы, или IDEF0-диаграммы;
- организационно-штатную компоненту, отражающую иерархию подчинения организационных единиц (подразделений, должностей, сотрудников);
- информационную компоненту, отражающую взаимосвязи (информационные и, в отдельных случаях, материальные) между функциональной и организационно-штатной компонентами, а также внутренние связи в функциональной компоненте, где применяются ERD-диаграммы;

• ИТ-компоненту, фиксирующую уровень и степень автоматизации объектов функциональной компоненты.

При этом в строках матрицы создаются:

- модели бизнес-среды предприятия (уровень бизнеса, внешняя среда),
- модели концептуального уровня (уровень предприятия),
- логические модели (уровень подразделений),
- физические модели (уровень технологий).

И3. Семейство стандартов IDEF, включающее 17 стандартов (5 из них находятся в разработке), из которых для целей моделирования БП использованы следующие: IDEF0 – стандарт функционального моделирования, созданный на основе SADT и являющийся подмножеством названной нотации; IDEF1 – стандарт моделирования информационных потоков, основанный на диаграммах «сущность – связь» в нотации Чена, и IDEF1X – стандарт построения реляционных структур данных; IDEF2 – стандарт динамического моделирования, базирующийся на нотации цветных сетей Петри; IDEF3 – язык описания процессов, определяющий последовательность выполнения действий и взаимозависимости между ними.

Однако следует отметить, что данное семейство моделей, в отличие от двух вышеперечисленных, слабо интегрировано. В моделях отсутствуют соответствующие механизмы, и обычно интеграция осуществляется вручную на основании привязки интегрированных компонент в словарях данных DD.

Архитектура предприятия				
	Процессы (Как)	Люди (Кто)	Данные (Что)	ИТ-инфраструктура (Средства автоматизации)
Содержание: контекстуальное	Контекстная диаграмма 	Организационная схема верхнего уровня 	Список сущностей предметной области 	Перечень классов систем
Организация: концептуальная	Диаграммы уровня процессов 	Организационная схема со сферами деятельности 	Диаграмма сущностей без атрибутов 	Перечень используемых систем
Модель системы: логическая	Логическая схема процессов 	Организационная схема уровня подразделений 	Диаграмма сущностей с атрибутами 	Перечень функций систем
Модель системы: физическая	Детальная схема процессов 	Ролевая организационная структура 	Матрица Сущность\Функциональный объект 	Матрица Системы\Процессы

Рис. 2. Интеграция моделей в схеме Захмана

Примерами трансляционных технологий являются:

Т1. Технология перехода от статических моделей в динамические (прежде всего, в сети Петри); теоретические основы такого подхода приведены в монографии [16].

Неформально переход к сети Петри осуществляется на основании преобразования статической функциональной (DFD или IDEF0) и частично информационной моделей. Такое преобразование базируется на том, что маркер сети Петри моделирует порцию потока данных, а позиция – накопление и хранение таких порций. Каждая из диаграмм функциональной модели трансформируется в соответствующую компоненту (подсеть) иерархической сети Петри. При этом процессы и потоки DFD-диаграммы (активности и потоки IDEF0-диаграммы) отображаются, соответственно, переходами и позициями. Хранилища данных и внешние сущности также преобразуются в позиции для каждого входящего (исходящего) потока (при этом для внешних сущностей маркируются позиции, соответствующие исходящим из них потокам). На

основе информационной модели определяются правила срабатывания переходов в зависимости от значений, которые принимают атрибуты используемых сущностей.

Т2. Технология перехода от формализованных моделей в формальные, в частности, переход от IDEF0 или DFD к смешанному графу, имеющему узлы и ребра различных типов – например, узлы, соответствующие функциям, ресурсам и организационным единицам, и ребра, соответствующие различным типам связей между узлами (к примеру, ребра использования ресурсов различными функциями, ребра связи функций с их исполнителями и т. д.).

Согласно данной технологии производится автоматическая трансляция диаграмм в прототип графа и доработка этого прототипа вручную. При этом наибольшие трудности заключаются в сложности алгоритмов преобразования иерархической диаграммной модели в плоский граф. Ручная доработка графа заключается в идентификации участков, которые могут выполняться параллельно, идентификации возможных вариантов продолже-

ния (т. е. выбора бизнес-функции и указания ее возможных последователей) и т. п. Алгоритмы такого перехода приведены в монографии [4].

Интерес представляет метод перехода от еРС-диаграмм к сетям Петри [17], позволяющий однозначно конвертировать матричную форму описания модели БП в нотации еРС в матричное представление сети Петри. Особенностью метода является отсутствие ограничений на ресурсы БП, моделируемые фишками в позициях сети Петри, что позволяет использовать канонические сети и, соответственно, исследовать топологию БП, обнаруживать циклы и тупики, находить инварианты сети и тем самым решать задачу генерации множества сценариев БП, используя при этом традиционные методы исследования сетей Петри. Следует отметить, что основанная на данном методе технология может классифицироваться и как технология перехода от статических моделей в динамические.

Т3. Технология перехода от функциональных моделей в информационные, базирующиеся на выделении из потоков и хранилищ данных информации о составе и структуре информационных объектов с последующим ее преобразованием на основе правил реляционной алгебры. В частности, в работе [3] предлагается следующая схема такого перехода – «функциональная модель в нотации DFD – предварительная информационная схема – концептуальная информационная схема в нотации ERD». При этом осуществляется формализованное построение «правильной» модели путем нормализации ERD с использованием нормальных форм Кодда, заключающейся в преобразовании схемы к наиболее простой третьей нормальной форме.

Т4. Технология перехода от моделей бизнес-процессов к требованиям по их автоматизации, задаваемых структурными картами и схемами [4]. Данный подход базируется на методах транзакционного и трансформационного анализа.

Транзакционный анализ является методом идентификации типов транзакций системы для их дальнейшего использования в качестве структурных единиц БП, при этом транзакция определяется как объект, содержащий следующие пять компонент: СОБЫТИЕ в системе или ее внешнем окружении, СИГНАЛ к системе, ДЕЙСТВИЕ системы, ОТКЛИК от системы, ВЛИЯНИЕ на систему или ее окружение. Транзакционные типы могут быть идентифицированы по иерархии диаграмм на основании типов отдельных событий, которые получает эта система. Если модель БП включает в себя событийную модель, то транзакционные типы могут быть без труда выявлены, например, из иерархии диаграмм переходов состояний. В свою очередь, трансформационный анализ или проектиро-

вание трансформационного (преобразующего) центра является методом преобразования в структурную карту каждой из частей иерархии диаграмм, которые были выделены при транзакционном анализе.

3. МЕТОДЫ ИНЖИНИРИНГА БИЗНЕС-ПРОЦЕССА

Интегрирующим ядром методов данной группы является многоуровневая модель БП [18], включающая организационно-штатную структуру предприятия, собственно модель БП на языке смешанных графов, а также данные о ресурсах различного вида.

Нижний уровень модели содержит информационные объекты (ИО), представляемые с помощью кортежей $D_i(a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^n)$, где D_i – идентификатор i -го ИО, a_i^j – j -й атрибут i -го ИО. Бизнес-операция моделируется парой $T_i D_j = (T_i, D_j)$, где T_i – тип операции с ИО. При этом $T_i D_j = (T_i a_i^1, T_i a_i^2, \dots, T_i a_i^k)$, однако для ряда операций могут существовать такие индексы m , что $T_i a_i^m = a_j^m$, т. е. операция может применяться не ко всем атрибутам ИО. Бизнес-функция моделируется кортежем бизнес-операций $I_m((T_{1m}, D_{1l}), \dots, (T_{km}, D_{kl}))$, где I_m – подразделение или роль исполнителя; T_{1m}, \dots, T_{km} – элементы множества $\{T_i\}$; D_{1l}, \dots, D_{kl} – элементы множества $\{D_j\}$. Модель БП представляет собой граф управления бизнес-функциями

$GBP(N, \{n_0\}, \{n_\phi\}, E, M, EM, EN, R, ER)$, где N – множество узлов, каждый из которых соответствует бизнес-функции; $\{n_0\}$ и $\{n_\phi\}$ – множества входных и завершающих узлов соответственно; E – множество управляющих ребер такое, что $\forall n_i, n_j \in N \cup \{n_0, n_\phi\}: (n_i, n_j) \in E$, если возможна ситуация, когда за выполнением бизнес-функции n_i будет выполняться бизнес-функция n_j ; M – множество узлов, соответствующих структурным единицам предприятия (вплоть до роли конкретного исполнителя); EM – множество ребер подчиненности такое, что $\forall m_i, m_j \in M: (m_i, m_j) \in EM$, если структурная единица m_i подчинена структурной единице m_j ; EN – множество ребер исполнения бизнес-функции такое, что $\forall m_i \in M, n_j \in N: (m_i, n_j) \in EN$, если бизнес-функция n_j может быть выполнена в подразделении m_i ; R – множество ресурсов предприятия; ER – множество ребер использования ресурсов такое, что $\forall r_i \in R, n_j \in N: (r_i, n_j) \in ER$, если бизнес-функция n_j использует при своем выполнении ресурс r_i .

Формальный аппарат решения задачи инжиниринга БП основан на введении специальной параллельной атрибутной порождающей грамматики (БП-грамматики), назначение которой заключается

в умении строить любые правильные цепочки (сценарии) выполнения БП (т. е. возможные последовательности необходимых для выполнения процесса бизнес-функций), не генерируя при этом ни одной неправильной цепочки. Параллельной атрибутной порождающей грамматикой для БП называется следующая упорядоченная девятка объектов [4, 18]:

$$G = (V_N, V_T, V_0, P, A_s, M_s, A_n, M_n, C),$$

где V_T – множество терминальных символов; V_N – множество нетерминальных символов; $V_0 \subseteq V_N$ – множество начальных символов; P – множество порождающих правил; A_s – конечное множество синтезируемых атрибутов; M_s – множество методов синтеза атрибутов; A_n – конечное множество наследуемых атрибутов; M_n – множество методов наследования атрибутов; C – множество символов, определяющих параллелизм.

Первые четыре объекта G определяют традиционным образом порождающую грамматику. Следующие четыре объекта определяют множество свойств (атрибутов), характеризующих символы порождаемых цепочек, и правила обработки этих свойств, фактически являясь дополнительными механизмами передачи информации и обработки некоторых не контекстно-свободных аспектов синтаксиса языка моделирования БП (например, к ним относятся требования ограничений по ресурсам). Последний символ предназначен для обеспечения возможности порождения подцепочек бизнес-функций, которые могут (но не обязательно должны) выполняться параллельно.

Алгоритм построения грамматики G из графовой модели БП GBP приведен в работах [4, 18]. Порождающие правила G имеют вид:

- $A \Rightarrow AB \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$ или $A\{o_j\} \Rightarrow A\{o_j\}B \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$, где A, B – бизнес-функции; r_m – значение m -го ресурса, требуемого при исполнении функции B ($1 \leq m \leq k$); o_j, o_i – идентификаторы подразделений в рамках организационно-штатной структуры, исполняющих функции A и B соответственно;

- $A' \Rightarrow AB \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$ или $A\{o_j\}' \Rightarrow A\{o_j\}B \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$, где символ “'” означает возможность параллельного исполнения бизнес-функций, для чего необходимо наличие еще по крайней мере одного правила $A' \Rightarrow AC$ (или $A\{o_j\}' \Rightarrow A\{o_j\}C$ соответственно);

- $s_0 \Rightarrow A \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$ или $s_0' \Rightarrow A \{(r_1, r_2, \dots, r_k)\} \{o_i\}$, где $A \in V_0$, а s_0 – квазиначальный символ в ситуации, когда $|V_0| > 1$.

Отметим, что при параллельном исполнении бизнес-функций B и C необходимо соблюдение

следующих условий завершения параллелизма: $(B \Rightarrow^* aD) \wedge (C \Rightarrow^* bD)$, где $D \in V_N$, a и b – произвольные цепочки нетерминальных символов (бизнес-функций), не включающие одинаковых символов, или $(B \Rightarrow^* aV) \wedge (C \Rightarrow^* bW)$, где $V, W \in V_T$ (или $V \in V_T, W \in V_N$). Другими словами, возможны два варианта завершения параллельного БП: слияние параллельных участков или независимое завершение каждого из них.

Введение в грамматику синтезируемых атрибутов и методов их синтеза позволяет порождать только цепочки, удовлетворяющие заранее известным ограничениям на совокупное использование бизнес-процессом одного или нескольких ресурсов. Назначение наследуемых атрибутов заключается в необходимости передавать на последующие шаги порождения БП информацию о местах выполнения бизнес-функций в рамках организационно-штатной структуры предприятия.

Важным моментом инжиниринга БП является оценка качества его структуры, базирующаяся на общесистемных метриках сцепления и связности, отражающих взаимозависимости входящих в процесс функций. Неформально сцепление является мерой взаимозависимости бизнес-функций в БП и оценивает, насколько хорошо входящие в него функции отделены друг от друга (фактически понятие сцепления обобщает и развивает механизмы передачи параметров между компонентами программных систем). Связность, в свою очередь, определяет, как сгруппированные в одной функции действия связаны друг с другом.

Значения на шкале метрики связности соответствуют типам связных областей в графе GBP . В монографии [18] определены следующие типы связных областей: функциональная, последовательная, информационная, процедурная, временная, логическая и случайная (связность отсутствует), перечисленные от лучшей к худшему. В частности, функционально связной областью в GBP называется подмножество вершин $N_k \subset N$ графа GBP такое, что:

- $\exists! n_k \in N_k$ такая, что \exists путь $(n_0, n_{i1}, \dots, n_{in}, n_k)$, для которого $n_j \notin N_k$ (при $j = i1, \dots, in$), т. е. существует путь из начальной вершины n_0 в вершину n_k , не проходящий через N_k ;

- \exists путь (n_{i1}, \dots, n_{in}) такой, что $n_j \in N_k$ (при $j = i1, \dots, in$) и $\forall \alpha, \beta \in N_k$ путь (α, \dots, β) является подпутем пути (n_{i1}, \dots, n_{in}) .

Неформально функционально связной областью является область, содержащая объекты, предназначенные для выполнения одной и только одной задачи (расчет заработанной платы, начисление налога на прибыль и т. п.).



Аналогично определены следующие типы сцеплений, фактически являющиеся обобщением типов механизмов передачи параметров между компонентами программных систем: по данным, по шаблону, по управлению, по общей области и по содержимому. При этом необходимо отметить определенную «вторичность» сцепления – статистические данные [4] показывают, что приоритетные типы связности, а именно функциональная, последовательная, информационная и процедурная, обеспечивают, как правило, и приемлемые типы сцепления. При этом чем лучше связность, тем лучше и сцепление.

В табл. 5 [18] приведены качественные оценки каждого из введенных типов связности по таким характеристикам, как сцепление, легкость модификации, понятность и удобство сопровождения.

Отметим, что в рамках теории БП разработаны алгоритмы определения типа связности и сцепления произвольного БП, а также расширение грамматики G (благодаря механизму синтезируемых атрибутов), позволяющее строить возможные сценарии выполнения БП с заданным типом связности.

Применение метрик сцепления и связности к задачам оценки качества БП получило свое развитие в работах [19, 20].

В работе [19] для обеспечения необходимого и достаточного уровня детализации функциональной модели БП предложен следующий критерий глубины детализации: каждому потоку данных нижнего уровня функциональной модели должен соответствовать один информационный объект, использующийся в процессах предметной области и являющийся для них неделимым. Для обеспечения полноты состава ИО модели предметной области предложены критерии верификации модели, а также определен состав исходных данных, необходимых для формализованного контроля соблюдения этих критериев. Также предложен метод выявления общесистемных ИО на основании их характеристик значимости, в которых учитывается лишь сам факт использования ИО в процессах, а не их количественные характеристики. Данный

метод позволяет осуществить оценку количественных характеристик сцепления БП по ИО путем введения коэффициента информационного сцепления Kc , отражающего среднее количество общих ИО для пары БП:

$$Kc = \sum_{j=1}^{N(N-1)/2} Mpj \cdot \frac{2}{N(N-1)},$$

где Mpj – количество общих ИО у j -й пары БП; N – количество БП в функциональной модели; $N(N-1)/2$ – количество пар БП.

Экспериментальные исследования [19] показали, что зависимость сцепления от характеристик использования ИО в БП носит нелинейный характер. Тем не менее, анализ ряда моделей крупных отечественных предприятий позволил сделать вывод о том, что характеристики сцепления 10–15 % ИО с наибольшими коэффициентами использования оказывают наибольшее влияние на суммарное сцепление модели, следовательно, для обеспечения логической целостности информационной модели эти ИО обязательно должны войти в ее состав. С другой стороны, при анализе распределения ИО в соответствии с коэффициентами их использования в БП установлено, что около 80 % ИО имеют малые коэффициенты использования (около 0,2), определяющие их локальную значимость для отдельных БП. Вместе с тем существует небольшая группа ИО (около 10 %), имеющих большие значения коэффициентов использования (около 0,8), что определяет их общесистемный характер – это те же ИО, которые оказывают наибольшее влияние на сцепление БП. Отметим, что предложенный метод позволяет ограничить размерность корпоративной модели данных, обеспечивая при этом ее логическую целостность.

В работе [20] предложен метод исследования и корректировки диаграмм потоков данных, основанный на оценке неравномерности распределения потоков данных DFD-диаграмм с использованием анализа связей. Для решения задачи строится ряд матриц взаимодействия элементов диаграммы DFD (матрица взаимодействия накопителей данных и процессов, матрица взаимодействия процес-

Таблица 5

Оценка типов связности

Тип связности	Сцепление	Модифицируемость	Понятность	Сопровождение
Функциональная	Хорошее	Хорошая	Хорошая	Хорошее
Последовательная	Хорошее	Средняя	Хорошая	Хорошее
Информационная	Хорошее	Хорошая	Средняя	Среднее
Процедурная	Хорошее	Средняя	Хорошая	Среднее
Временная	Среднее	Хорошая	Средняя	Хорошее
Логическая	Среднее	Средняя	Хорошая	Хорошее

сов и др.) и на их основе строится матрица взаимодействия всех видов элементов диаграмм (процессов, внешних сущностей и накопителей данных). Роль элементов диаграммы DFD можно определить с помощью степени центральности [21], демонстрирующей «активность» узла в сети и изменяемым количеством его связей с другими элементами. При этом при вычислении коэффициента центральности для диаграммы DFD, который должен быть минимизирован, необходимо учитывать виды элементов и семантику связей между ними (например, не может существовать связь между двумя накопителями данных). Используемые при этом значения весовых коэффициентов элементов напрямую зависят от вышеописанных типов связности, стандартизованных ISO/IEC/IEEE 24765 [22].

4. МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ, АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА

Очевидно, что спроектированный БП (даже с хорошими сцеплением и связностью) может содержать различные ошибки, наиболее массовыми из которых являются ошибки, связанные с порядком обработки ИО и получившие название ошибок в потоках данных. Специфика данного класса ошибок для БП обусловливается наличием регламентов доступа к атрибутам ИО, запрещающих или ограничивающих доступ при выполнении ряда бизнес-операций. Например, такой атрибут сотрудника, как его зарплата, на ряде предприятий доступен только руководству и сотрудникам бухгалтерии.

В монографии [4] предложен комплекс моделей и методов обнаружения и локализации ошибок данного класса, базирующийся на теории зависимости по данным [23]. При этом в качестве модели БП используется подграф уровня операций вышеопределенного графа GBP . Формально такой подграф описывается как $GBP1(N, E, n_0, R1, ER1)$, где N, E и n_0 имеют тот же смысл, что и в графе GBP ; $R1 \subset R$ – множество информационных объектов (подмножество множества ресурсов предприятия); $ER1 \subset ER$ – множество ребер использования информационных объектов. С каждым из узлов такого подграфа, являющихся элементами множества N , связаны три типа событий, касающихся обработки информационных объектов: определение маски (прав доступа к атрибутам ИО), определение ИО при заданной маске, использование ИО при заданной маске. При этом с каждым из узлов может ассоциироваться произвольная комбинация этих событий.

Для целей тестирования на графе $GBP1$ вводится трехуровневая модель данных. На первом уровне строится среда данных – множество всех определений всех аргументов бизнес-функции, для которых существует маршрут из точки входа в БП в рассматриваемую точку, на котором все элементы множества не переопределены. На втором уровне строится контекст данных – множество наборов из n определений различных атрибутов, для которых существует маршрут из точки входа в БП в рассматриваемую точку, на котором все элементы набора принадлежат среде данных (т. е. не переопределены). На третьем уровне строится упорядоченный контекст данных – множество упорядоченных наборов из n определений различных атрибутов, для которых существует маршрут из точки входа в БП в рассматриваемую точку, на котором все элементы набора принадлежат среде данных и выполняются в порядке, предписываемом данным набором. Соответствующие критерии тестирования требуют, чтобы каждый элемент среды данных, контекста данных и упорядоченного контекста данных каждой бизнес-функции был проверен по крайней мере однажды (критерии C_2 , C_3 , и C_4 соответственно). Известные критерии тестирования, основанные на анализе графовой модели объекта и требующие проверки каждой ветви или каждого функционального узла (бизнес-функции) графа по крайней мере однажды, обозначим традиционно C_1 и C_0 соответственно.

Пусть M^B – множество, элементами которого являются все возможные подмножества множества маршрутов в некотором бизнес-процессе B . Будем говорить, что некоторый ИО является определенным в БП, если на каждом использующем его маршруте по крайней мере одному из его атрибутов присваивается некоторое значение. Тогда для БП, в которых отсутствуют неопределенные и неиспользуемые ИО, а также конструкции типа *skip*, справедлива следующая теорема иерархии критерии.

Теорема. Любое множество маршрутов $M_k \in M^B$, удовлетворяющее требованиям критерия C_i для $1 \leq i \leq 4$, также удовлетворяет и требованиям любого из критериев C_j при $1 \leq j < i$.

Таким образом, предложенные критерии тестирования позволяют:

- обеспечить обнаружение специфических для БП ошибок в потоках данных, связанных с их обработкой под различными масками, обеспечивающими регламенты доступа;

- обеспечить выявление всех тех ошибок, обнаружение которых может производиться с помощью традиционных критериев, основанных на анализе программных графов и применяемых к БП.



Аналогичный подход, основанный на теории зависимости по данным, используется и при статическом анализе потоков данных, базирующимся на введении специальной дисциплины взаимодействия состояний ИО на любом этапе выполнения БП. Состояние ИО определяется последним обращением к нему и задается следующим образом:

$$S_i(A = (a_1, a_2, \dots, a_m)) = \\ = (i, Q = (q_1, q_2, \dots, q_m), D = (d_1, d_2, \dots, d_m)),$$

где i – номер узла графа бизнес-процесса; q_j – тип обращения к j -му атрибуту ИО: $q_j \in \{w, r, n\}$, где w – определение атрибута, r – использование атрибута, n – отсутствие обращения к атрибуту; d_j – элемент маски доступа к j -му атрибуту ИО: $d_j \in \{W, R, N\}$, где W – разрешение доступа на определение атрибута, R – разрешение доступа на использование атрибута, N – запрещение доступа к атрибуту.

Не нарушая общности, будем считать, что ИО содержит единственный атрибут. При анализе потоков данных основное внимание обращается на последовательность состояний ИО (т. е. фактически на последовательность определений (использований) его атрибутов). Будем обозначать эту последовательность следующим образом: $d^{i1}q^{i1}d^{i2}q^{i2} \dots d^{ik}q^{ik}$, где верхний индекс обозначает номер узла графа $GBP1$, в котором производится обращение к рассматриваемому ИО. Для корректной работы БП по крайней мере должны удовлетворяться следующие пять правил, касающихся построенной последовательности состояний ИО:

- 1) последовательность не должна содержать цепочек $\dots d^i q^i \dots$, в которых $d^i = N$, а $q^i \in \{w, r\}$;
- 2) последовательность не должна содержать цепочек $\dots d^i q^i \dots$, в которых $d^i = R$, а $q^i = w$;
- 3) $\forall i$ такого, что $(q^i = r) \wedge (d^i \neq N) \exists j < i$ такое, что $(q^j = w) \wedge (d^j = W)$;
- 4) $\forall i, j$ таких, что $(q^i = w) \wedge (d^i = W) \wedge (q^j = w) \wedge (d^j = W) \exists i < k < j$ такое, что $(q^k = r) \wedge (d^k \neq N)$;
- 5) $\forall i$ такого, что $(q^i = w) \wedge (d^i = W) \wedge (\exists j > i$ такого, что $(q^j = w) \wedge (d^j = W)) \exists k > i$ такое, что $(q^k = r) \wedge (d^k \neq N)$.

Нарушения перечисленных правил вызывают ошибки при выполнении БП (или по крайней мере являются симптомами ошибок) и могут происходить по следующим причинам: попытки использования неопределенных атрибутов ИО; повторные определения атрибутов без промежуточного их использования; некорректные определения прав доступа к ИО и их атрибутам; неиспользуемые ИО и (или) их атрибуты; ошибки в маршрутизации ИО, приводящие к задержкам (например, график ремонта из-за неверной последовательности функций).

ций: формирование наряда-задания, накладных, заявок на запчасти); отсутствующие ИО и (или) их атрибуты (например, уровень воды для плана восстановления после наводнения) и др.

Кроме вышеперечисленных методов обнаружения и частичной локализации широкого класса ошибок в потоках данных БП в ряде работ рассматриваются вопросы обнаружения отдельных видов ошибок из других классов (ошибки в потоках управления, ошибки взаимодействия и др.). Так, например, проверка согласованности DFD-диаграмм в статье [24] осуществляется на модели, представленной сетью Петри, а в публикации [25] – на языке темпоральной логики.

Одной из наиболее известных работ в данной области является исследование [7], в котором формулируются и формализуются синтаксические и семантические правила построения и определения DFD-диаграмм для проверки их согласованности в иерархической модели БП (вертикальное и горизонтальное балансирование, межуровневое согласование и т. п.). Авторами вводится теоретико-множественное определение DFD и контекстной диаграммы и формулируются 11 правил, определяющих корректные взаимодействия между объектами диаграмм.

Диаграмма потоков данных определяется как множество $D = \{P, F, S, E\}$, где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество процессов; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ – конечное множество потоков данных; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ – конечное множество хранилищ данных; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – конечное множество внешних сущностей. В свою очередь, контекстная диаграмма определяется как множество $C = \{<e_i, f_j, p_1>, <p_1, f_k, e_i>\}$, где $j \neq k$, $1 \leq i, j, k \leq m$. Отметим, что эти определения уже регламентируют ряд синтаксических и семантических ограничений на иерархию диаграмм, нарушения которых приводят в дальнейшем к неадекватной модели БП, а именно:

- контекстная диаграмма состоит только из одного процесса и набора внешних объектов и потоков данных;
- хранилище данных может существовать только на диаграмме потоков данных, но не на контекстной диаграмме;
- поток данных может соединять внешнюю сущность с процессом и наоборот, при этом входящие в процесс и исходящие из него потоки данных должны различаться.

Перечень правил с краткими комментариями к ним приводится ниже:

- 1) $\forall p_i, p_j \in P \quad p_i \neq p_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;
- 2) $\forall f_i, f_j \in F \quad f_i \neq f_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;
- 3) $\forall s_i, s_j \in S \quad s_i \neq s_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;

- 4) $\forall e_i, e_j \in E \ e_i \neq e_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;
- 5) $\forall f_i \in C \ \exists f_j \in D \ f_i = f_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;
- 6) $\forall e_i \in C \ \exists e_j \in D \ e_i = e_j$, где $1 \leq i, j \leq m$;
- 7) $\forall e_i, e_j, s_i, s_j \in D \ D \neq \{e_i, f_k, e_j\} \wedge D \neq \{s_i, f_k, s_j\}$, где $1 \leq i, j, k \leq m$;
- 8) $\forall e_i, s_i, f_k \in D \ D \neq \{e_i, f_k, s_i\} \wedge D \neq \{s_i, f_k, e_i\}$, где $1 \leq i, j, k \leq m$;
- 9) $\forall p_i, s_i, f_j, f_k \in D \ D = \{p_i, f_j, s_i\} \wedge D = \{s_i, f_k, p_i\}$, $f_j \neq f_k$, где $1 \leq i, j, k \leq m$;
- 10) $\forall e_i, p_i, f_j, f_k \in D \ D = \{e_i, f_j, p_i\} \wedge D = \{p_i, f_k, e_i\}$, $f_j \neq f_k$, где $1 \leq i, j, k \leq m$;
- 11) $\forall p_i, p_j, f_j, f_k \in D \ D = \{p_i, f_j, p_j\} \wedge D = \{p_i, f_k, p_i\}$, $f_j \neq f_k$, где $1 \leq i, j, k \leq m$.

Согласно правилам 1–4 имена процессов, потоков данных, хранилищ и внешних сущностей являются уникальными, их дублирование не допускается. Правила 5 и 6 указывают, что для любого потока данных или внешних сущностей, относящихся к контекстной диаграмме, этот объект данных должен существовать и в диаграмме потоков данных. Правило 7 указывает, что для любой диаграммы поток данных не может соединять один внешний объект с другим внешним объектом, и поток данных также не может соединять одно хранилище данных с другим хранилищем данных, а правило 8 – что для любой диаграммы поток данных не может соединять внешнюю сущность с хранилищем данных и наоборот. Правила 9 и 10 декларируют, что при существовании потока данных от процесса к хранилищу данных или внешней сущности должен существовать другой поток (поток с другим именем) от хранилища или, соответственно, внешней сущности к процессу. Наконец, правило 11 указывает, что для любого потока данных, соединяющего два процесса, может существовать и обратный поток с другим именем.

Несмотря на кажущуюся очевидность этих правил они, согласно опыту автора, неоднократно нарушаются в практической деятельности как консультантами при разработке моделей БП реальных предприятий, так и студентами в большинстве их курсовых и дипломных работ.

5. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ

При исследовании параллельных БП [26] были выделены следующие их классы, отражающие характер реализуемого параллелизма и основанные на известной классификации параллельных систем, предложенной М. Флинном [27]:

– ОКОД (Одиночный поток Команд и Одиночный поток Данных) – последовательные БП,

– МКМД (Множественный поток Команд и Множественный поток Данных) – асинхронные БП,

– ОКМД (Одиночный поток Команд и Множественный поток Данных) – синхронные (векторные) БП,

– МКОД (Множественный поток Команд и Одиночный поток Данных) – конвейерные или магистральные БП.

Данная классификация строится на понятиях потока данных и потока управления, являющихся основополагающими в современной теории БП. В частности, эти объекты являются ключевыми в языках моделирования БП.

Работы по проектированию и исследованию параллельных БП на современном этапе ведутся в двух направлениях: создание визуальных языков, позволяющих описывать параллельные конструкции, и разработка методов распараллеливания описаний на традиционных языках визуального моделирования. В свою очередь, очевидно, что для решения первой задачи возможны два подхода – расширение существующих языков с целью их ориентации на параллельные БП и создание новых языков моделирования параллельных БП.

В качестве примеров параллельных расширений можно привести соответствующие конструкции в DFD-технологии и языке UML. В обоих случаях моделирование параллельного поведения сводится к описанию параллельных потоков управления и способов взаимодействия между ними с использованием аппарата конечных автоматов. В DFD-технологии такие потоки являются объектами диаграмм потоков управления CFD (*Control Flow Diagrams*) на верхнем уровне и диаграмм переходов состояний STD (*State Transition Diagrams*) на нижних уровнях соответственно. В UML предусмотрен целый спектр специальных средств, предназначенных для более тонкого, детального и явного моделирования поведения при параллельном выполнении процесса (в данном случае – вычислительного). Однако и здесь применяются диаграммы переходов состояний благодаря их расширению с использованием параллельных составных состояний и введения ряда дополнительных конструкций, таких как активное состояние, конфигурация активных состояний, область параллельного составного состояния, составной переход, синхронизирующее состояние. Языки моделирования класса EML (*Enterprise Modeling Languages*) органично включают в себя средства моделирования параллельных процессов, имеющие тот же уровень абстракции, что и все другие языковые средства. Так, один из наиболее часто



используемых языков данного класса, базирующийся на нотации BPMN, содержит такие конструкции, как параллельное исполнение без синхронизации, параллельное исполнение с синхронизацией, координацию исполнения, а также ряд паттернов завершения, в совокупности реализующих соответствующие механизмы синхронизации.

В части создания новых языков для описания МКОД-параллелизма разработан язык моделирования конвейерных БП [28], описывающий процесс в виде ациклического ориентированного графа, вершинами которого могут быть функциональные операции или спусковые функции. Набор функциональных примитивов, позволяющих описывать конвейерные БП, включает такие конструкции, как операция, линейный конвейер, функции мультилинирования-редуцирования, конъюнкции-дизъюнкции, раздачи-приема и др.

Необходимо отметить, что конструкции всех без исключения вышеперечисленных языков моделирования параллельных БП имеют значительно более низкий уровень абстракции по сравнению с широко используемыми диаграммными техниками, такими как IDEF0, DFD и др., и уже не способны играть роль языков «для передачи понимания», фактически являясь классическими языками моделирования и находясь с языками первого типа в соотношении «ассемблер – язык высокого уровня».

По аналогии с вычислительными процессами методы распараллеливания БП включают распараллеливание их линейных участков и повторяющихся конструкций (циклов). В статье [28] даны определения линейного участка и цикла, введенные на графе *GBP*, представленном в § 3 настоящей статьи. При распараллеливании основное внимание обращается на последовательность определений (использований) ИО (по аналогии с методами верификации БП, рассмотренными в § 4 данной статьи), при этом выявляются информационные зависимости между функциями БП. Для БП используются традиционные для вычислительных процессов виды информационных зависимостей – потоковая (истинная) зависимость, антизависимость, зависимость по выходу и зависимость по входу [29]. Перечисленные зависимости (кроме зависимости по входу, которая не играет существенной роли в анализе зависимостей) являются основой методов и алгоритмов распараллеливания линейных участков и циклов [30], при этом анализируется информационная зависимость между итерациями цикла.

Заметим, что при решении задачи инжиниринга бизнес-процесса (см. § 3) имеется возможность порождения параллельных сценариев. Для этого

при инжиниринге БП необходимо иметь возможность указания функций и операций, которые могут выполняться параллельно, а для корректного выполнения параллельных сценариев необходимо иметь средства их инициации и завершения, а также механизмы их взаимодействия.

Для идентификации параллельных участков необходимо нагрузить граф бизнес-процесса *GBP* соответствующей информацией. Одним из вариантов решения этой задачи является создание привязанной к графу *GBP* матрицы, в которой отмечаются возможности параллельного выполнения его компонентов, задаваемые табл. 6 [4].

Таблица 6

Задание параллелизма в бизнес-процессе

	<i>A'</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
<i>A'</i>		*	*	*			
<i>B</i>						+	+
<i>C</i>							
<i>D</i>					+	+	
<i>E</i>						+	+
<i>F</i>							+
<i>G</i>							

Названия строк и столбцов соответствуют компонентам БП. Символ «'» означает начало выполнения параллельного процесса, символы «*» показывают, что соответствующие компоненты могут (но не обязательно должны) выполняться параллельно. Символы «+» указывают возможные варианты последовательности выполнения компонентов БП – например, они означают, что после выполнения компоненты *D* может быть выполнена как компонента *E*, так и компонента *F*.

Соответствующий алгоритм построения параллельной грамматики из графовой модели бизнес-процесса *GBP*, нагруженной таблицами, определяющими параллелизм, приведен в работах [4, 18].

Для установления правильной очередности выполнения сценариев служит механизм синхронизации. Задача синхронизации заключается в организации доступа сценариев к разделяемым с другими сценариями ресурсам таким образом, чтобы они неискажали результатов выполнения БП.

Простейшим и универсальным механизмом синхронизации вычислительных процессов являются семафоры Дейкстры (Dijkstra). Реализация этого механизма связана с введением целочисленных переменных специального типа (семафоров) и двух неделимых операций *P* и *V*, которые выполняются над семафорами и обеспечивают единственный способ обращения к ним. Механизм семафоров успешно применяется и при синхрониза-

ции БП. В качестве примера рассмотрим синхронизацию двух параллельных сценариев, имеющих обращение к некоторому общему ресурсу r :

$$\begin{array}{c} A' \longrightarrow B \ C(r) \ D \\ | \longrightarrow E \ F(r) \ G. \end{array}$$

Функции C и F могут быть функциями обращения к эксперту для получения консультации, а r характеризует время, затрачиваемое на консультацию.

Осуществим синхронизацию с использованием семафора s :

$$\begin{array}{c} A' f \longrightarrow B \ p(s) \ C(r) \ v(s) \ D \\ | \longrightarrow E \ p(s) \ F(r) \ v(s) \ G, \end{array}$$

где f : $s = 1$; $p(s)$: если $s = 1$, то $s = s - 1$; $v(s)$: $s = s + 1$.

Общепризнанным недостатком семафоров является то, что бесконтрольное их использование запутывает структуру управления параллельным процессом, и велика вероятность возникновения ошибок при описании сложных взаимодействий. Для повышения уровня средств взаимодействия сценариев и устранения недостатков, присущих семафорам, могут применяться и другие механизмы синхронизации, используемые в вычислительных процессах: условные критические интервалы Хоара (Hoare), а также реализация концепции процесса-секретаря, централизующего управление параллельными сценариями. В качестве примеров можно привести монитор Хоара и Хансена (Hansen), сентинелл Кеплера (Kepler), управляющие выражения Кемпбелла (Campbell) и Хабермана (Haberman). Отметим, что все они активно применяются на практике и легко обнаруживаются при изучении регламентов выполнения БП, где они описаны в неформализованном виде.

6. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В рамках создания и исследования языков, моделей и методов моделирования БП в настоящее время активно разрабатываются и развиваются:

- языки класса EML – языки моделирования предприятий;
- формальные языки моделирования, базирующиеся на смешанных графах и различных диалектах сетей Петри;
- методы формального описания синтаксиса и семантики языков моделирования, позволяющие строить правильные языковые конструкции и обнаруживать ошибки соответствующих классов;
- стандарты языков моделирования.

Языки класса EML и расширяющие их языки класса EEML (*Extended Enterprise Modeling Languages* – расширенные языки моделирования предприятий) [31] используются для моделирования предприятия на нескольких уровнях и сочетают в себе структурное моделирование БП, моделирование иерархии целей и моделирование ресурсов. Фактически EEML разделяются на четыре подъязыка с четко определенными связями между ними, предназначенными для моделирования процессов (функционального моделирования), моделирования данных, моделирования ресурсов и моделирования целей. По сути, EEML представляет собой вариант интеграционной технологии моделирования БП, расширенный за счет моделей ресурсов и целей. А введенный в § 3 настоящей статьи язык смешанных графов является формальным вариантом EEML с отсутствующей моделью целей. Дальнейшее развитие идеи EEML получили в объединенном общеевропейском проекте UEML (*Unified Enterprise Modelling Language*), целями создания которого были «определение, проверка и распространение набора основных языковых конструкций для поддержки унифицированного языка моделирования предприятий под названием UEML, который послужит основой для взаимодействия в рамках интеллектуальной организации или сети предприятий» [32].

В области развития формальных языков моделирования особенно перспективно направление, связанное с разработкой новых диалектов языка сетей Петри. Это обусловлено тем, что обычные (канонические) сети Петри [33] не отражают временных параметров моделируемых объектов, что является их существенным ограничением в качестве инструмента моделирования. Поэтому необходимо создание и исследование более сложных и развитых сетей Петри. Модификации, как правило, касаются следующего:

- введения иерархии (иерархические сети Петри);
- определения различий в маркерах, каждый из которых имеет свои уникальные характеристики (цветные (раскрашенные) сети Петри);
- введения многоместных (содержащих несколько маркеров) позиций, как последовательных, так и параллельных (сети Петри с многоместными позициями).

Активно развивается и направление, связанное с расширением традиционных визуальных языков моделирования БП различными формальными конструкциями, обеспечивающими анализ и верификацию моделей. Например, в работах [10–12] предлагаются соответствующие расширения DFD-



диаграмм, а в докладе [34] для расширения диаграмм активности языка UML (*Unified Modeling Language*) в целях проектирования и верификации параллельных БП предлагается использовать полихроматические множества [35].

Отдельно стоит вопрос стандартизации в области моделирования БП. По аналогии с системами стандартов, разработанными для близких областей (например, для системной и программной инженерии), система стандартизации в рассматриваемой области должна включать следующие три группы стандартов:

- стандарты и нормативные документы общеинформационного характера, регламентирующие терминологию предметной области и описывающие структуру двух других блоков;
- документы директивного, руководящего или рекомендательного характера по процессу моделирования, описывающие этапы процесса моделирования, а также организационные элементы процесса;
- стандарты и нормативные документы, относящиеся к результату, вырабатываемому процессом моделирования.

Отметим, что многие крупные отечественные ИТ-компании (прежде всего, системные интеграторы) в составе комплекса своих корпоративных стандартов имеют фрагменты, относящиеся к области моделирования БП. Однако их полнота и соответствие вышеперечисленным группам с учетом их детализации, приведенной в работе [36], явно недостаточны, что подтверждают представленные в статье [36] примеры для компаний, занимающейся внедрением крупной ERP-системы, а также предприятия – производителя пищевой продукции.

Что касается стандартизации на международном, государственном и отраслевом уровне, то имеющиеся стандарты, по сути, отражают лишь языковые и, частично, методологические аспекты моделирования БП. К ним, в первую очередь, можно отнести следующие документы:

- Р 50-1-028-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Методология функционального моделирования (в рамках комплекса рекомендаций по стандартизации в области CALS-технологий);
- OMG: Unified Modeling Language 2.0, включающий направление *Unified Modeling Language: Infrastructure* (версия 2.0, март 2006 г.) по совершенствованию нотаций и средств моделирования, позднее представленный в качестве стандарта ISO/IEC 19501:2005;
- OMG: Business Process Model and Notation 2.0 (январь 2011 г.);
- OMG: System Modeling Language 3.1 (июнь 2012 г.).

Отметим, что в части рекомендаций Р 50-1-028-2001 имеется постановление Госстандарта РФ № 256-СТ от 02.07.2001 г. о принятии и введении в действие основанных на IDEF0 рекомендаций по стандартизации. А собственно семейство стандартов IDEF (*Integrated Computer Automated Manufacturing Definition*), созданное ВВС США как решение проблемы повышения производительности и эффективности информационных технологий, возникшей при реализации программы ICAM, включает 17 стандартов, часть из которых имеет непосредственное отношение к моделированию БП, а именно: IDEF0 (модель функций), IDEF1 и его расширение IDEF1X (информационная модель и модель данных соответственно), IDEF2 (динамическая модель), IDEF3 (модель процессов) и IDEF4 (объектно-ориентированные методы проектирования). При этом часть из них фактически осталась на бумаге (стандарт IDEF2), другая часть (IDEF0 и IDEF1X) превратилась в стандарт правительства США, известный как FIPS.

Перечисленные документы относятся к третьей группе стандартов, точнее, к ее подгруппе по языкам моделирования. Отметим, что данная группа содержит как минимум следующие подгруппы: стандарты, регламентирующие состав, структуру и содержание моделей объекта; стандарты, обеспечивающие возможность контроля качества результатов; стандарты, обеспечивающие применение результатов по назначению; стандарты, регламентирующие состав, структуру и содержание отчетной документации по моделям. При этом полностью отсутствуют международные стандарты из первых двух групп.

Перспективный подход к стандартизации языков моделирования БП предложен в работе [37]. Он базируется на унификации не только синтаксиса и семантики языка, но и элементов его прагматики. Говоря об амбициозности рассматриваемых стандартов и ссылаясь при этом на эмпирические исследования [38, 39], авторы указывают на их неспособность соответствовать практическим потребностям моделирования.

Традиционный подход к решению этой проблемы заключается в создании стандартных языков моделирования (например, UML или BPMN), которые объединяют и интегрируют различные перспективы моделирования. Однако в реальном использовании «стандартизирующий» и «интегрирующий» эффект этих языков размывается. Это

обычно проявляется в появлении «вариантов», «облегченных версий» и расширений стандарта, имеющих дело с «отсутствующими аспектами» которые изменяют исходное определение языка, сокращая, расширяя или адаптируя его к текущей задаче моделирования. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что эти «варианты» появляются, чтобы компенсировать неспособность стандартного языка адекватно соответствовать потребностям конкретных ситуаций моделирования.

В работе [37] обосновывается, что имеет смысл явно учитывать pragматические потребности при определении, пересмотре или развитии языка моделирования БП. Определить их можно, например, ответив на следующие вопросы:

- Какова общая область компетенции языка моделирования бизнес-процессов?
- Должен ли язык моделирования охватывать такие аспекты, как бизнес-правила, ресурсы и т. п.?
- Должен ли язык включать объекты, связанные с организационным моделированием, имеющие значение для таких задач, как документирование, мониторинг и реорганизация процессов?

Область применения языка моделирования БП должна соответствовать контексту, в котором он будет использоваться, т. е. целям создания моделей. Если в языке априори не предусмотрено достаточноной поддержки, появятся «варианты» для конкретных целей, чтобы компенсировать недостающее. С другой стороны, если язык моделирования ориентирован на одновременное покрытие слишком многих целей, то он имеет тенденцию стать чрезмерно сложным при стремлении учесть различные pragматические потребности. Предлагаемый подход заключается в организации языка моделирования процессов (в рамках соответствующего стандарта) в виде нескольких языковых модулей. Модульная организация языков могла бы иметь языковые «фрагменты», ограниченные и ориентированные на цели, для которых используется «фрагмент». Целевой язык для конкретной предметной области и ситуации моделирования мог бы затем быть скомпонован из различных «фрагментов», основываясь на pragматических потребностях фактической ситуации моделирования. А поскольку в настоящее время растет интерес к гибкости языков моделирования и поддерживающих их инструментов, считается, что это одно из перспективных направлений будущих исследований [37, 39].

Среди множества методов поддержки жизненного цикла БП имеются пробелы по этапам реорганизации и верификации, а также в части межэтапных переходов, в частности:

- за небольшим исключением (критерии сцепления и связности) отсутствуют формальные метрики и критерии оценки качества и других характеристик БП у консультантов, строящих модели процессов «as is» и «to be», отсутствует инструментарий обоснования предлагаемых ими решений;

- задача обнаружения и локализации ошибок в БП решена лишь для класса ошибок в потоках данных, для остальных классов (ошибки в управляющих потоках, операциях над данными и др.) остается необходимость в разработке соответствующих методов [40];

- слабо развиты методы перехода от моделирования, анализа и верификации БП к требованиям по его автоматизации, которая является наиболее актуальной в современных условиях [41].

Отметим, что исследованию характеристик процессов (процессных метрик) посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов (см., например, работы [42–49]). Однако большинство из них относится ко всему предприятию в целом и отражает его экономические показатели, такие как производительность (количество выполненной работы за определенный период времени), стоимость (затраты на выполнение операций, связанных с производством товаров или предоставлением услуг), соответствие установленным стандартам и ожиданиям (процент брака, количество возвратов) и др.

Эти показатели, по сути, относятся к качеству собственно процесса весьма опосредовано, фактически декларируя следующее – если результат процесса в виде товара (услуги) имеет надлежащее качество, то подразумевается, что и процесс должен быть соответствующего уровня. Система менеджмента качества [47, 48] на базе международных стандартов ISO 9000-2000 предлагает, по сути, противоположный подход – если процесс имеет высокое качество, то и производимый им товар (услуга) также должны быть соответствующего качества. Доминантой данного подхода является требование наличия описания деятельности (процессов, работ, функций, операций) для всех ее участников, от рядового клерка до высшего руководства, – именно это является ключевым при проведении аудита и получении соответствующего «сертификата качества». При этом само описание может варьироваться от традиционных текстовых регламентов, методик и инструкций до моделей на языках визуального моделирования процессов [4]. Имеется и собственный стандартизованный язык описания процессов, являющийся диалектом традиционных блок-схем [47]. Отметим, что данная



система предполагает лишь наличие описаний деятельности, никак при этом не концентрируясь на адекватности описания процесса, его корректности, структурированности и т. п.

Таким образом, необходимо сформировать комплекс метрик, названных системно-структурными и оценивающих собственно процесс как сложную систему, его структуру, схемы взаимодействия компонент, функциональные и информационные связи и т. д. Другими словами, одной из сторон качественной оценки процесса является его исследование с позиций теории систем на предмет анализа его структуры, управляющих и информационных потоков, выявление критичных участков.

В работе [48] приведен ряд метрик качества БП, некоторые из которых могут рассматриваться как системно-структурные, они сведены в табл. 7.

Приведенные метрики, безусловно, играют важную роль при оценке качества процесса, однако они носят разрозненный, несистемный характер. Для комплексного оценивания качества предлагается использовать следующую совокупность характеристик процесса (отметим, что они в совокупности включают в себя перечисленные в табл. 6 метрики):

- уровень зрелости в соответствии с СММ/СММ [50],
- уровень терпимости пользователя к ошибкам [51],
- метрики сцепления и связности,
- набор метрик, восходящих к метрикам качества вычислительных процессов (нагрузка по входу и выходу, мобильность и др.).

Перечисленные характеристики отражают базовые принципы теории систем и системного анализа – такие, как, например, принцип конечной цели, принцип иерархии, принцип функциональности, принцип единства, принцип связности, принцип модульного построения и др.

Таким образом, для решения задачи оценки качества БП необходимо выявить совокупность си-

стемно-структурных характеристик качества процесса и установить затем для каждой характеристики измеримые показатели, позволяющие оценить, в какой степени процесс обладает определенным свойством. Следующая задача заключается в необходимости формирования интегрированной оценки качества процесса как функции значений частных показателей. При этом сложность решения этой задачи обусловливается влиянием следующих факторов:

- Практически для любой формулы количественной зависимости можно подыскать опровергающие примеры, ставящие под сомнение приемлемость ее как критерия качества процесса.

- Многие частные характеристики качества процессов противоречивы, при этом вызывают затруднения попытки определить, какие из них являются более существенными.

В части исследований и применений параллельных БП отметим, что для ОКМД-параллелизма (синхронных БП) в настоящее время отсутствуют какие-либо языковые средства его организации. По-видимому, в качестве основы такого параллелизма могут быть использованы результаты теории программирования в части организации векторных и матричных структур данных и методов их размещения и обработки, а также языков программирования векторных вычислений. При этом для решения данной задачи необходимо соответствующее расширение информационных моделей БП (в частности, ERD).

Развитие и создание методов распараллеливания БП, включая распараллеливание их линейных участков и повторяющихся конструкций, имеют важнейшее значение при решении задач, связанных с их реорганизацией. Эффективность применения таких методов может превысить эффект от «горизонтального и вертикального уплотнения» БП [1, 3] – двух наиболее эффективных механизмов реинжиниринга БП.

Таблица 7

Системно-структурные метрики бизнес-процесса

Метрика	Пояснение
Сложность иерархической структуры	Отношение количества уровней декомпозиции процесса к общему числу процессов в модели
Уровень управления	Отношение количества элементарных процессов к количеству управляющих процессов
Затраты ресурсов	Отношение количества используемых входов процесса к количеству его выходов
Уровень регламентации	Отношение количества регламентирующих процесс документов к общему числу процессов в модели
Уровень разрывности	Отношение количества разрывов в процессе к общему числу процессов в модели
Средняя длина пути	Отношение длины маршрута к общему количеству маршрутов в процессе

Также имеется необходимость в разработке методов верификации с целью обнаружения ошибок в БП, связанных с их параллелизмом, например, таких, как:

- отсутствие операций синхронизации для некоторых общих ресурсов,
- взаимная блокировка параллельных сценариев БП (тупик),
- повторный запуск на выполнение сценария до окончания его предыдущего запуска и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы в рамках междисциплинарных исследований сформировалось новое направление, связанное с унификацией и формализацией различных видов человеческой деятельности и получившее название методологии (методологии деятельности). Данное направление, посвященное разработке единой теории деятельности в виде совокупности общих и универсальных моделей, представлено трудами А. М. Новикова и Д. А. Новикова и их коллег [52–54]. В этих работах неоднократно отмечается процессная структура деятельности как неотъемлемая ее часть (наряду с логической, причинно-следственной и др.).

С другой стороны, в настоящее время вопросам исследования процессов различных категорий посвящено значительное число работ. При этом существующие подходы и полученные в их рамках результаты не позволяют единообразно описывать процессы создания и поведения современных сложных систем. Поэтому актуальной является задача создания общей теории процессов [55], которая должна обеспечить систематизированный базис для решения таких задач, как:

- моделирование процессов;
- инжиниринг (проектирование) и реинжиниринг процессов, а также рассмотрение альтернативных решений названных задач;
- анализ и верификация процессов;
- автоматизация процессов и др.

Одним из подходов к созданию такой общей теории, интегрирующей и обобщающей частные теории для различных категорий процессов (прежде всего, вычислительных процессов и БП как наиболее развитых в настоящее время теорий), является подход, в рамках которого осуществляется развитие рассмотренной в данной работе теории БП с целью ее ориентации на различные категории деятельности, представленные в монографии [52]. В рамках этого подхода к настоящему моменту разработаны общий классификатор [55] и унифицированная модель процессов деятельности [56].

ЛИТЕРАТУРА

1. Hammer, M., Champy, J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution.* – N. Y.: Harper-Collins, 1993. – 288 p.
2. Калянов Г.Н. Бизнес-процессы: от аморфного определения к формальной теории // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 1. – С. 25–30. [Kalyanov, G.N. Business Processes: From Amorphous Definition to Formal Theory // Automation in Industry. – 2023. – No. 1. – P. 25–30. (In Russian)]
3. Fetais, A., Abdella, G.M., Al-Khalifa, K.N., Hamouda, A.M.S. Business Process Re-Engineering: A Literature Review-Based Analysis of Implementation Measures // Information. – 2022. – Vol. 13, no. 4. – Art. no. 185. – DOI: 10.3390/info13040185
4. Калянов Г.Н. Теория бизнес-процессов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 296 с. [Kalyanov, G.N. Teoriya biznes-protsessov. – Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2023. – 296 s. (In Russian)]
5. Калянов Г.Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 240 с. [Kalyanov, G.N. Modelirovaniye, analiz, reorganizatsiya i avtomatizatsiya biznes-protsessov. – Moscow: Finansy i statistika, 2006. – 240 s. (In Russian)]
6. Калянов Г.Н. Концептуальная модель DFD-технологии // Открытое образование. – 2017. – № 4. – С. 21–26. [Kalyanov, G.N. The Conceptual Model of DFD-Technology // Open Education. – 2017. – No. 4. – P. 21–26. (In Russian)]
7. Ibrayim R., Yen, S.Y. Formalization of the Data Flow Diagram Rules for Consistency Check // International Journal of Software Engineering and Applications (IJSEA). – 2010. – Vol. 1, no. 1. – P. 95–110.
8. Афанасьев А.Н., Шаров О.Г., Войт Н.Н. Анализ и контроль диаграмматических моделей при проектировании сложных автоматизированных систем. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 87 с. [Afanas'ev, A.N., Sharov, O.G., Voyt, N.N. Analiz i kontrol' diagrammaticheskikh modeley pri proektirovaniyu slozhnykh avtomatizirovannykh sistem. – Ul'yanovsk: Ul'yanovsk: UlGTU, 2016. – 87 s. (In Russian)]
9. Zhang, D.-Q., Zhang, K., Cao, J. A Context-Sensitive Graph Grammar Formalism for the Specification of Visual Languages // The Computer Journal. – 2001. – Vol. 44, no. 3. – P. 186–200.
10. Jilani, A., Nadeem, A., Kim, T.-H., Cho, E.-S. Formal Representations of the Data Flow Diagram: A Survey // Proceedings of 2008 Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications. – Hainan, China, 2008. – P. 153–158.
11. Оллонгрен А. Определение языков программирования интерпретирующими автоматами. – М.: Мир, 1977. – 288 с. [Ollongren, A. Definition of Programming Languages by Interpreting Automata. – London – New York: Academic Press, 1974. – 290 p.]
12. Larsen, P.G., Plat, N., Toetenel, H.A. Formal Semantics of Data Flow Diagram // Formal Aspects of Computing. – 2004. – Vol. 6, no. 6. – P. 586–606.
13. Hassen, M., Gargouri, F. Multi-dimensional Classification of Sensitive Business Process Modeling Aspects // Procedia Computer Science. – 2024. – Vol. 239. – P. 2158–2167. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.404>
14. Калянов Г.Н., Калянов Г.Н. Структурные модели бизнеса: DFD-технологии. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 256 с. [Kalyanov, A.N., Kalyanov, G.N. Strukturnye modeli biznesa: DFD-tehnologii. – Moscow: Finansy i statistika, 2003. – 256 s. (In Russian)]



- sa: DFD-tehnologii. – M.: Finansy i statistika, 2003. – 256 s. (In Russian)]
15. *Zachman, J.A.* A Framework for Information Systems Architecture // IBM Syst. J. – 1987. – Vol. 26, no. 3. – P. 276–292.
16. *Юдитский С.А.* Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. – M.: СИНТЕГ, 2001. – 112 с. [Yuditskiy, S.A. Stsenarnyy podkhod k modelirovaniyu povedeniya biznes-sistem. – Moscow: SINTEG, 2001. – 112 s. (In Russian)]
17. *Dorrer M.G.* Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри. – Моделирование и анализ информационных систем. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 5–16. [Dorrer, M.G. An Algorithm of Converting Business-Process Models into Monochrome Petri Nets on the Basis of Matrix Formulas. – Modeling and Analysis of Information Systems. – 2010. – Vol. 17, no. 2. – P. 5–16. (In Russian)]
18. *Калянов Г.Н.* Теория и практика реорганизации бизнес-процессов. – M.: СИНТЕГ, 2000. – 212 с. [Kalyanov, G.N. Teoriya i praktika reorganizatsii biznes-protsessov. – Moscow: SINTEG, 2000. – 212 s. (In Russian)]
19. *Тудер И.Ю.* Коллективное моделирование предметной области большой размерности: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – С.-Петербург: ООО «Авротех», 2002. – 22 с. [Tuder, I.Ju. Kollektivnoe modelirovanie predmetnoy oblasti bol'shoy razmernosti: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk). – Saint-Petersburg: OOO «Avroteh», 2002. – 22 s. (In Russian)]
20. *Kopp A.M., Орловский Д.Л.* Разработка подхода к анализу и оптимизации диаграмм потоков данных // ScienceRise. – 2017. – № 7 (36). – С. 33–42. [Kopp, A., Orlovskyi, D. Development of an Approach to Analysis and Optimization of Data Flow Diagrams // ScienceRise. – 2017. – No. 7 (36). – P. 33–42. (In Russian)]
21. *Fouss, F., Saerens, M., Shimbo, M.* Algorithms and Models for Network Data and Link Analysis. – Cambridge: Cambridge University Press, 2016. – 543 p.
22. *ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E).* Systems and Software Engineering. Vocabulary. – New York: IEEE, 2010. – 418 p.
23. *Ферранте Д., Оттенштейн К., Уоррен Д.* Граф программных зависимостей и его применение в оптимизации / Векторизация программ: теория, методы, реализация. – M.: Мир, 1991. – С. 141–182. [Ferrante, J., Ottenstein, K., and Warren, J. The Program Dependence Graph and Its Use in Optimization // ACM Transactions on Programming Languages and Systems. – 1987. – Vol. 9, no. 3. – P. 319–349.]
24. *Lee, P.T., Tan, K.P.* Modelling of Visualized Data-Flow Diagrams Using Petri Net Model // Software Engineering Journal. – 1992. – Vol. 7, iss. 1. – P. 4–12.
25. *Tong, L., Tang, C.S.* Semantic Specification and Verification of Data Flow Diagrams // Journal of Computer Science and Technology. – 1991. – Vol. 6, no. 1. – P. 21–31.
26. *Калянов Г.Н.* Моделирование параллельных бизнес-процессов // Открытое образование. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 39–46. [Kalyanov, G.N. Parallel Business Processes Modeling // Open Education. – 2021. – Vol. 25, no. 4. – P. 39–46. (In Russian)]
27. *Хокни Р., Джессхоп К.* Параллельные ЭВМ. – M.: Радио и связь, 1987. – 392 с. [Hockney, R.W., Jesshope, C.R. Parallel Computers : Architecture, Programming, and Algorithms. – Bristol: Adam Hilger Ltd., 1981. – 423 p.]
28. *Куприянов Б.В.* Метод эффективного анализа модели рекурсивного конвейерного процесса // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 3. – С. 63–79. [Kupriyanov, B.V. Method of Efficient Analysis of the Recursive Conveyor Process Models // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 78, no. 3. – P. 435–449.]
29. *Гергель В.П.* Теория и практика параллельных вычислений. – M.: ИНТУИТ. – 2007. – 296 с. [Gergel', V.P. Teoriya i praktika parallel'nykh vychisleniy. – Moscow: INTUIT. – 2007. – 296 s. (In Russian)]
30. *Векторизация программ: теория, методы, реализация* (сборник статей) / под ред. Г.Д. Чинина. – M.: Мир, 1991. – 272 с. [Vektorizacija programm: teorija, metody, realizacija (sbornik statej) / Ed. by G.D. Chinin. – Moscow: Mir, 1991. – 272 s. (In Russian)]
31. *Krogstie, J.* Using EEML for Combined Goal and Process Oriented Modeling: A Case Study. – Proceedings of 13th Workshop on Exploring Modeling Methods for Systems Analysis and Design EMMSAD. – Montpellier, France, 2008. – P. 112–129.
32. *Vernadat, F.* UEML: Towards a Unified Enterprise Modelling Language // Int. J. Production Research. – 2002. – Vol. 40, no. 17. – P. 4309–4321.
33. *Котов В.Е.* Сети Петри. – M.: Наука, 1984. – 160 с. [Kotov, V.E. Seti Petri. – Moscow: Nauka, 1984. – 160 s. (In Russian)]
34. *Gao, X., Li, Z., Li, S., Wu, F.* Modeling and Analyzing Concurrent Design Process for Manufacturing Enterprise Information Systems // Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – Taipei, Taiwan, 2006. – P. 4999–5003.
35. *Павлов В.В.* Полихроматические множества и графы в структурном моделировании свойств технических систем // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2008. – № 2. – 32 с. [Pavlov, V.V. Polychromatic Sets and Graphs for Structural Modeling of Technical Systems // Supplement to Information Technologies. – 2008. – No. 2. – 32 s. (In Russian)]
36. *Калянов Г.Н.* Требования к составу и структуре стандартов в области моделирования бизнес-процессов // Автоматизация в промышленности. – 2003. – № 4. – С. 19–21. [Kalyanov, G.N. Requirements for the Composition and Structure of Standards in the Field of Business Process Modeling // Automation in Industry. – 2003. – No. 4. – S. 19–21. (In Russian)]
37. *Bjeković, M., Proper H.A., Sottet, J.-S.* Enterprise Modelling Languages. Just Enough Standardisation? // Lecture Notes in Business Information Processing. – 2014. – Vol. 173. – P. 1–23.
38. *Malavolta, I., Lago, P., Muccini, H., et al.* What Industry Needs from Architectural Languages: A Survey // IEEE Trans. Software Eng. – 2013. – Vol. 39, no. 6. – P. 869–891.
39. *zur Muehlen, M., Recker, J.* How Much Language Is Enough? Theoretical and Practical Use of the Business Process Modeling Notation / In: Lecture Notes in Computer Science. Ed. by Z. Bellahsène and M. Léonard. – Berlin–Heidelberg: Springer, 2008. – Vol. 5074. – P. 465–479.
40. *Buss, A., Kratsch, W., Schmid, S.J., Wang, H.* ProcessLLM: A Large Language Model Specialized in the Interpretation, Analysis, and Optimization of Business Processes / In: Lecture Notes in Business Information Processing. Ed. by K. Gdowska, M.T. Gómez-López, and JR. Rehse. – Cham: Springer, 2025. –

- Vol. 534. – Р. 221–232. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-78666-2_17
41. *Maris, A., Ongena, G., Ravesteijn, P.* Business Process Management Maturity and Process Performance – A Longitudinal Study // In: Lecture Notes in Business Information Processing. Ed. by C. Di Francescomarino, A. Burattin, C. Janiesch, and Sadiq, S. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 490. – P. 355–371. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-41623-1_21
42. *Бабич В.В.* Факторы, влияющие на эффективность бизнес-процессов. – Экономика и бизнес: теория и практика. – 2019. – № 1. – С. 135–142. [Babich, V.V. Factors Influencing the Effectiveness of Business Processes. – Journal of Economy and Business: teoriya i praktika. – 2019. – No. 1. – P. 135–142. (In Russian)]
43. *Дьяков С.А., Шитухин А.М., Денисова О.Г.* Современные инструменты повышения эффективности бизнес-процессов организации в условиях цифровизации // Естественно-гуманитарные исследования. – 2022. – № 3 (41). – С. 135–141. [D'yakov, S.A., Shitukhin, A.M., Denisova, O.G., Kiryachek, V.V. Sovremennye instrumenty povyshenija effektivnosti biznes-processov orga-nizacii v uslovijah cifrovizacii // Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya. – 2022. – No. 3 (41). – S. 135–141. (In Russian)]
44. *Тошпулотов А.А., Варламова Е.В., Бурмистрова Л.В., Безпалько А.Р.* Исследование сущности понятия бизнес-процессов // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 11. – С. 175–180. [Toshpulotov, A.A., Varlamova, E.V., Burmistrova, L.V., Bezpal'ko, A.R. The Study of the Essence of the Concept of Business Processes // Fundamental Research. – 2024. – No. 11. – S. 175–180. (In Russian)]
45. *Калянов Г.Н., Аристова Н.И.* Характеристики качества промышленных бизнес-процессов // Друкеровский вестник. – 2025. – № 3. – С. 321–333. [Kalyanov, G.N., Aristova, N. Ig. Quality Characteristics of Industrial Business Processes // Drukerovskij vestnik. – 2025. – No. 3. – P. 321–333. (In Russian)]
46. *Cardoso, J.* How to Measure the Control-Flow Complexity of Web Processes and Workflows / In: The Workflow Handbook. – Ontario: Future Strategies Inc., 2005. – P. 199–212.
47. ГОСТ Р ИСО 9001-2001: Системы менеджмента качества – Требования (утв. Постановлением Госстандarta РФ от 15 августа 2001 г. N 333-ст). [GOST R ISO 9001-2001: Sistemy menedzhmenta kachestva – Trebovaniya (utv. Postanovleniem Gosstandarta RF ot 15 avgusta 2001 g. N 333-st). (In Russian)]
48. *Крайер Э.* Успешная сертификация на соответствие нормам ИСО серии 9000. – М.: ИЗДАТ, 1999. – 552 с. [Krajer, Je. Uspeshnaja sertifikacija na sootvetstvie normam ISO serii 9000. – Moscow: IZDAT, 1999. – 552 s. (In Russian)]
49. *Казаков О.Д., Азаренко Н.Ю., Лысенко А.Н.* Цифровой реинжиниринг моделей бизнес-процессов на основе их метрик качества // Экономика. Информатика. – 2023. – Т. 50, № 4. – С. 781–791. [Kazakov, O.D., Azarenko, N.Yu., Lysenko, A.N. Digital Reengineering of Business Process Models Based on Their Quality Metrics // Economics. Information Technologies. – 2023. – Vol. 50, no. 4. – P. 781–791. (In Russian)]
50. *CMMI – Quick Guide.* – URL: https://www.tutorialspoint.com/cmmi/cmmi_quick_guide.htm (дата обращения: 28.03.2025). [Accessed March 28, 2025.]
51. *Ramamoorthy, C.V., Ho, S.-B. F.* Testing Large Software with Automated Software Evaluation Systems // IEEE Trans. on Software Eng. – 1975. – Vol. SE-1, no. 1. – P. 46–58.
52. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с. [Novikov, A.M., Novikov, D.A. Metodologiya. – Moscow: SINTEG, 2007. – 668 s. (In Russian)]
53. *Новиков, А.М., Новиков, Д.А.* Методология научного исследования. – М.: Ленанд, 2017. – 272 с. [Novikov, A.M. and Novikov, D.A. Research Methodology: From Philosophy of Science to Research Design. – London: CRC Press, 2013.]
54. *Новиков Д.А.* Методология управления. – М.: Либроком, 2016. – 128 с. [Novikov, D.A. Control Methodology. – New York: Nova Science, 2013.]
55. *Калянов Г.Н., Новиков Д.А.* Классификация процессов деятельности // Проблемы управления. – 2025. – № 4. – С. 21–30. [Kalyanov, G.N., Novikov, D.A. Classification of Activity Processes // Control Sciences. – 2025. – No. 4. – P. 17–24.]
56. *Калянов Г.Н.* Унифицированная модель процессов человеческой деятельности // Теория активных систем – 55 лет (ТАС-55): труды юбилейной научно-практической конференции. – Москва, 2024. – С. 128–133. [Kalyanov, G.N. Unificirovannaja model' processov chelovecheskoj dejatel'nosti // Teorija aktivnyh sistem – 55 let (TAS-55): trudy jubilejnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Moscow, 2024. – S. 128–133. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии акаадемиком РАН Д. А. Новиковым.

Поступила в редакцию 29.05.2025,
после доработки 25.08.2025.
Принята к публикации 01.10.2025.

Калянов Георгий Николаевич – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, kalyanov@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2429-0703>

© 2025 г. Калянов Г. Н.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](#)



THEORY OF BUSINESS PROCESSES: PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

G. N. Kalyanov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ kalyanov@ipu.ru

Abstract. The state-of-the-art of the theory of business processes is analyzed, and its main directions are classified. For each direction, main models and methods are briefly overviewed, their gaps and shortcomings are identified, and basic directions of their development are formulated. In particular, the following basic directions to develop this theory are distinguished: the transition from business process modeling languages to enterprise modeling languages, the creation and development of formal modeling languages, the creation and analysis of formal descriptive methods for the syntax and semantics of modeling languages, and the standardization and unification of modeling languages. It is proposed to adapt some methods and models of the theory with orientation towards the general theory of activity processes. The latter theory provides a systematic foundation for solving numerous problems: process modeling, engineering and reengineering of processes, analysis and verification of processes, automation of processes, etc.

Keywords: business process model, visual language, semantics, pragmatics, process engineering, verification, parallelism.