

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ НОТАЦИИ BPMN

С. А. ПОТРЯСАЕВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: spotryasaev@gmail.com*

Представлено описание разработанных аналитических логико-динамических моделей сложных процессов и соответствующих технологий. Описание дополнено динамическими имитационными моделями, построенными на основе нотаций BPMN.

Ключевые слова: комплексное моделирование, моделирование бизнес-процессов, логико-динамические модели, проактивное управление, автоматизация комплексного моделирования

Введение. Современные предприятия в таких наукоемких отраслях экономики, как судостроение, аэрокосмическая отрасль, топливно-энергетический и военно-технический комплексы и т.п. представляют собой сложные объекты (далее — объекты), взаимосвязанные со сложными производственными процессами. Вызванная современными реалиями необходимость модернизации предприятий, повышения конкурентоспособности продукции на мировом и отечественном рынках и разработки соответствующего комплекса мер по пересмотру производственных технологических процессов обуславливает увеличение числа входящих в их состав сложных систем и объектов, а также рост числа внутренних связей. Сложность современных объектов проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования и выбора модели поведения, сложность принятия решений, сложность процессов развития и моделирования [1].

Комплексное моделирование процесса функционирования сложных объектов. Изучение сложных объектов требует совместного использования разнотипных моделей, методов и алгоритмов. Для повышения степени обоснованности и достоверности прогнозов развития существующих и проектируемых объектов необходимо проведение упреждающего моделирования и многовариантного анализа различных сценариев реализации жизненных циклов рассматриваемых объектов, основанного на концепции комплексного моделирования (КМ).

Под комплексным моделированием сложных объектов любой природы будем понимать методологию и технологии их описания, а также комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием и развитием рассматриваемых объектов в динамически изменяющихся внешних и внутренних условиях [2, 3]. Комбинированное использование разнородных моделей, методов и алгоритмов позволяет взаимно компенсировать их объективно существующие недостатки и ограничения, одновременно усиливая их положительные качества.

Более того, КМ производственных процессов (ПП) предприятия — это шаг к его проактивному управлению. В отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления, ориентированного на оперативное реагирование на инциденты и последующее их недопущение, проактивное управление предполагает предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых упреждающих возможностей (таких как параметрическая адаптация моделей к прошлому,

настоящему и будущему) при формировании и реализации управляющих воздействий на основе парирования не следствий, а причин, вызывающих нештатные, аварийные и кризисные ситуации на предприятии.

Наряду с преимуществами КМ ПП возникает и ряд проблем, связанных с его применением. Так, первая и, пожалуй, самая главная особенность КМ ПП заключается в необходимости осуществлять согласование используемых моделей, методов и алгоритмов на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях. Эмерджентный эффект от КМ может быть достигнут только при выполнении глубокого обоснованного согласования частных моделей, основанного на принципах координации декомпозированных моделей и полимодельных комплексов [4].

Вторая проблема — это анализ выполнимости производственной программы, т.е. определение, возможно ли достижение заданных показателей качества ПП с учетом имеющихся пространственно-временных, технических, технологических и ресурсных ограничений. Третья проблема состоит в необходимости на всех этапах моделирования широко использовать современные средства автоматизации, что позволит сократить временные, материальные и другие затраты. Третья проблема также связана с этапом ввода исходных данных, который остается исключительно трудоемким даже при наличии средств автоматизации моделирования.

Более того, при решении различных задач структурно-функционального синтеза объектов в рамках КМ возникают и новые трудности [3]:

- большая размерность и нелинейность моделей, описывающих структуру и варианты функционирования элементов и подсистем сложных объектов;
- необходимость конструктивного учета в моделях факторов неопределенности, связанных с воздействием внешней среды на сложный объект;
- необходимость многокритериальной оптимизации на полимодельном комплексе.

Современные средства автоматизации процессов комплексного моделирования сложных объектов. Для преодоления указанных трудностей разработаны многочисленные инструментальные средства и среды автоматизации имитационного моделирования, например: GPSS, AnyLogic, BPsim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESimL, Simulab, NetStar, Pilgrim, МОСТ, КОГНИТРОН и т. д. [5]. В последнее время данные средства дополняются интеллектуальными информационными технологиями (нейросети, мультиагентные системы, нечеткая логика, технологии эволюционного моделирования и т. п.). Совместному применению этих инструментальных средств в рамках КМ препятствует отсутствие общепринятых механизмов согласования используемых моделей как на техническом, так и на глубоком семантическом уровне.

Кратко остановимся на возможностях современных средств описания и автоматизации процессов КМ сложных объектов. На начальном этапе аналитико-имитационного моделирования (АИМ) объекта целесообразно выполнить его описание с применением какой-либо известной спецификации. На сегодняшний день существует около десяти популярных языков описания процессов.

Одной из первых формальных моделей, предназначенных для описания процессов, является модель сети Петри. Вследствие ограниченных выразительных возможностей этой модели для представления операционной семантики на практике она используется, как правило, в качестве основы для других языков [6].

Группа стандартов IDEF (Integrated DEFinition) насчитывает 15 отдельных направлений, но широкое распространение получили только IDEF0 (функциональное моделирование), IDEF1 (моделирование информационных потоков) и IDEF3 (документирование технологических процессов).

Активно используемые диаграммы UML больше ориентированы на описание архитектуры программного обеспечения и поддержку объектно-ориентированного подхода, чем на описание технологических и логистических процессов.

Стандарт eEPC (Extended Event Driven Process Chain — расширенная нотация описания цепочки процесса, управляемого событиями) успешно применяется для описания ресурсных потоков и потоков событий, но вызывает трудности при описании технологических и логистических процессов, в которых используется большое количество ресурсов и средств. Как и стандарт eEPC, нотация BPMN (Business Process Model and Notation — нотация и модель бизнес-процессов) предназначена для описания диаграмм бизнес-процессов, понятных как техническим специалистам, так и бизнес-пользователям, и применительно к комплексному моделированию производственных процессов представляет большой интерес. К преимуществам BPMN относятся следующие: множество используемых примитивов объединяет в себе достоинства других нотаций и позволяет на хорошем уровне представлять модели распределенных процессов; обеспечивает широкие возможности для формального представления компонентов сложных процессов [6].

Описание процессов функционирования сложных объектов в нотации BPMN может непосредственно вводиться в имитационную модель и далее использоваться при комплексном моделировании.

Аналитические логико-динамические модели функционирования сложных объектов. Говоря об аналитическом моделировании следует учитывать, что параметры и структуры сложного объекта на различных этапах его жизненного цикла постоянно изменяются при воздействии различных факторов (объективных и субъективных, внутренних и внешних). Эта особенность в работе [3] названа структурной динамикой сложных технических объектов. Анализ возможных вариантов формального описания процессов управления структурной динамикой сложных объектов показал, что целесообразно при их создании ориентироваться на класс логико-динамических моделей (ЛДМ) [7, 8].

В общем случае применительно к описанию процессов функционирования предприятия сформирована следующая обобщенная ЛДМ:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}(t) | \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{0}; \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}; \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = \|\mathbf{x}^{(o)T} \mathbf{x}^{(r)T} \mathbf{x}^{(s)T}\|^T$; $\mathbf{u} = \|\mathbf{u}^{(o)T} \mathbf{u}^{(r)T} \mathbf{u}^{(s)T}\|^T$ — обобщенные векторы состояния и управления производственными процессами предприятия (индекс „o“ относится к модели управления операциями, „r“ — к модели управления ресурсами, „s“ — к модели управления потоками); $\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$ — известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора \mathbf{x} в моменты времени $t = t_0$ и $t = t_f$; $\mathbf{q}^{(1)}, \mathbf{q}^{(2)}$ — векторные функции, с помощью которых задаются основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования предприятия.

Наряду с ЛДМ функционирования предприятия (1), как правило, вводятся векторы частных показателей качества управления операциями ($\mathbf{J}^{(o)}$), ресурсами ($\mathbf{J}^{(r)}$) и потоками ($\mathbf{J}^{(s)}$), которые объединяются в векторный показатель качества:

$$\mathbf{J} = \|\mathbf{J}^{(o)T} \mathbf{J}^{(r)T} \mathbf{J}^{(s)T}\|^T. \quad (2)$$

На основе выражений (1) и (2) могут быть поставлены и решены различные классы задач мониторинга, планирования и оперативного управления [9—12].

Для конкретизации модели (1) приведем упрощенный вариант ее описания (M'). В этом случае основные технологические и технические ограничения, определяющие очередность последовательно-параллельного выполнения операций на предприятии, могут быть представлены в следующем виде:

$$M' = \left\{ \mathbf{u} \mid \dot{x}_i = \sum_{j=1}^m u_{ij}; \sum_{i=1}^n u_{ij}(t) \leq 1; \sum_{j=1}^m u_{ij} \leq 1; u_{ij}(t) \in \{0, 1\}; \right. \\ \left. t \in (t_0, t_f] = T; x_i(t_0) = 0; x_i(t_f) = a_i; \right. \\ \left. \sum_{j=1}^m u_{ij} \left[\sum_{\alpha \in \Gamma_{1i}^-} (a_\alpha - x_\alpha(t)) + \prod_{\beta \in \Gamma_{i2}^-} (a_\beta - x_\beta(t)) \right] = 0; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \right\}, \quad (3)$$

где $x_i(t)$ — переменная, характеризующая состояние операции в момент времени t ; a_i — заданный объем операции; $u_{ij}(t)$ — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если операция D_i выполняется с использованием ресурса B_j предприятия, и значение 0 — в противном случае; $\alpha \in \Gamma_{1i}^-$, $\beta \in \Gamma_{i2}^-$ — множество номеров операций, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией D_i с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“; T — интервал времени, на котором рассматривается процесс функционирования предприятия; t_0, t_f — начальный и конечный моменты времени.

Необходимо подчеркнуть, что именно учет данных ограничений позволяет разработанную модель (1) отнести к классу логико-динамических моделей.

Важной особенностью предлагаемого полимодельного комплекса, описывающего как модели процессов управления операциями (M_o) и потоками (M_s), так и модели управления ресурсами (M_r), является учет технологических и потоковых составляющих производственного процесса. Так, например, модель M_o влияет на модель M_r с использованием вектора управления $\mathbf{u}^{(o)T}$. Вектор $\mathbf{u}^{(o)T}$, в свою очередь, посредством соответствующих ограничений оказывает влияние на модель M_s , которая с помощью краевых условий определяет моменты времени начала выполнения операций [1].

Оригинальность и основные достоинства разработанного комплекса аналитических ЛДМ, дополненного соответствующим комплексом динамических имитационных моделей, описывающих возмущающие воздействия внешней среды на производственные процессы и построенных на основе нотаций BPMN, состоят в следующем. Во-первых, в отличие от ранее предложенных подходов к формальному описанию рассматриваемого класса логико-динамических моделей управления сложными объектами [13, 14], все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, имеющие сугубо нелинейный характер, учитываются не при задании дифференциальных уравнений, описывающих динамику соответствующих процессов, а при формировании области допустимых значений управляющих воздействий. При этом предлагаемая динамическая интерпретация комплекса операций позволяет существенно сократить размерность решаемых задач оптимизации, определяемую числом независимых путей в обобщенном графе выполняемых работ. Во-вторых, конструктивный учет нестационарности функционирования сложных объектов (в данном случае судостроительной верфи) осуществляется на основе введения многомерных динамических матричных функций „контактный потенциал“ и „потенциал доступности“ [15—17]. В-третьих, учет факторов неопределенности предусматривает адаптацию параметров и структур моделей к прошлому, текущему и возможным будущим состояниям объектов управления на основе многовариантного сценарного прогнозирования и комплексного упреждающего аналитико-имитационного моделирования.

Следует еще раз особо подчеркнуть, что использование предложенного варианта формализации логико-динамических моделей управления сложными объектами позволяет с применением единого языка (и соответствующей нотации) описать как процессы разработки плана управления объектами, так и процессы его реализации, а также процессы многовариантного прогнозирования различных сценариев проактивного управления объектами. И, последнее, в рамках предложенной формализации разработано несколько подходов к решению проблемы многокритериальной оптимизации управления структурной динамикой объектов. Данные подходы базируются на комбинированном использовании математического аппарата нечеткой логики и теории планирования эксперимента [18, 19].

Сопоставление элементов аналитической модели и концептов нотации BPMN. Рассмотренный комплекс аналитических логико-динамических моделей опирается на соответствующую концептуальную модель, включающую понятия „операция“, „ресурс“, „цель“, „задача“, „поток“, „структура“, описание которых приведено в работе [20]. С использованием перечисленных концептов задаются различные классы отношений, которые, в свою очередь, определяются пространственно-временными, техническими, технологическими, энергетическими, материальными, информационными и другими ограничениями, характерными для каждой конкретной предметной области.

Подробный анализ нотации BPMN 2.0.2 (особенно раздела “BPMN Process Execution Conformance”) позволяет сделать вывод о возможности ее применения при формировании набора исходных данных для аналитической модели вида M (см. таблицу).

Концепт аналитической модели	Концепт BPMN	Имеющиеся в BPMN сведения	Расширенные сведения для аналитической модели
Операция	Task	Идентификатор, название, используемые ресурсы	Целевой объем операции, допустимость прерывания
Ресурс	Resource	Идентификатор, название, запасы, стоимость разового использования, стоимость поминутного использования	Производительность
Цель	—	—	Значения переменных состояния в конечный момент времени
Поток	Sequence Flows / Message Flows	Идентификатор, название, источник, приемник	Максимальная скорость потока
Структура	Pool	Идентификатор, название, состав ресурсов, доступность	Суммарная производительность

Как следует из таблицы, в основе нотации BPMN недостаточно декларированных атрибутов для проведения аналитического моделирования. В то же время нотация BPMN изначально создавалась как расширяемый язык, что позволяет свободно дополнять описание моделей необходимыми атрибутами, не теряя обратной совместимости со средами его исполнения.

Записанный в нотации BPMN сложный процесс с необходимыми дополнительными атрибутами может быть исполнен в среде аналитического моделирования, основанной на динамической интерпретации процессов выполнения операций и распределения ресурсов сложных объектов.

Таким образом, с использованием модели сложного процесса, описанной в расширенной нотации BPMN, может быть выполнено одновременно имитационное и аналитическое моделирование, что позволяет говорить о согласовании модели на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях.

Преимущество, обусловленное расширением области применения нотации BPMN, заключается в значительном снижении трудоемкости ввода исходных данных для проведения

аналитического моделирования реальных производственных систем. Например, при рассмотрении математических моделей производственных процессов в судостроении речь идет о десятках тысяч переменных и тысячах ограничений. Во-первых, нотация BPMN обеспечивает упрощение ввода и наглядность данных за счет наличия графического представления и ограниченного числа концептов. Во-вторых, производственные процессы многих предприятий уже описаны в этой нотации и подготовка исходных данных для аналитического моделирования сводится к вводу некоторых дополнительных атрибутов концептов. Так появляется возможность на всех этапах комплексного моделирования использовать современные средства автоматизации.

Пример. Предложенный в настоящей статье подход был применен в ходе научно-исследовательских работ по выбору методов и алгоритмов решения задач комплексного и имитационного моделирования, а также многокритериальному анализу производственных систем судостроительных предприятий. Для проведения КМ производственные процессы, включая технологические и вспомогательные, были представлены в нотации BPMN.

Согласованное использование имитационной и аналитической логико-динамической моделей на основе применения нотации BPMN позволило расширить набор анализируемых показателей функционирования судостроительного предприятия и провести их расчет, а также осуществить многокритериальное оценивание и анализ структурной динамики предприятия при различных вариантах входных воздействий.

Важно еще раз подчеркнуть, что разработанное специальное программно-математическое обеспечение КМ объектов с использованием нотации BPMN представляет собой унифицированное современное средство автоматизации моделирования, построенное на сервис-ориентированной архитектуре и веб-технологиях.

Заключение. Рассмотрение вопросов комплексного моделирования производственных процессов предприятия в общем контексте управления структурной динамикой позволяет, во-первых, непосредственно связать общие цели, на достижение которых ориентировано предприятие, с целями, которые реализуются в ходе управления производственными процессами; во-вторых, обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций, другими словами, синтезировать технологию управления производственными процессами предприятия, и, в-третьих, осознанно находить компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов предприятия.

Статья подготовлена по результатам исследования, выполненного при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-00199).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Б. В., Охтилев М. Ю., Плотников А. М., Потрясаев С. А., Юсупов Р. М. Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации // Тр. Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. „Имитационное моделирование. Теория и практика“ (ИММОД-2015). М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2015. С. 58—81.
2. Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С. В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1988.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
5. Плотников А. М., Рыжиков Ю. И., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференции „Имитационное моделирование. Теория и практика“ (ИММОД)) // Тр. СПИИРАН. 2013. № 2 (25). С. 42—112.

6. Троцкий Д. В., Городецкий В. И. Сценарная модель знаний и язык описания процессов для оценки и прогнозирования ситуаций // Тр. СПИИРАН. 2009. Вып. 8. С. 94—127.
7. Потрясаев С. А. Способ организации аналитико-имитационного моделирования АСУ сложными техническими объектами // Материалы конф. „Информационные технологии в управлении“ (ИТУ-2014). СПб, 2014. С. 226—231.
8. Мальшиева И. В., Назаров Д. И., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Методологические и методические основы адаптивного структурно-функционального синтеза облика информационной системы // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015: Материалы Восьмой Междунар. конф. М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2015. С. 120—122.
9. Потрясаев С. А. Решение задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 54—59.
10. Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 62—68.
11. Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Полимодельное описание и алгоритмы комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе // Тр. Третьей Междунар. конф. „Системный анализ и информационные технологии“, САИТ-2009, Звенигород, 14—18 сент. 2009 г. М.: 2009. С. 919—928.
12. Потрясаев С. А. Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 46—52.
13. Зимин И. Н., Иванюков Ю. П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Журн. вычисл. математики и математ. физики. 1971. № 3. С. 632—641.
14. Зимин И. Н. Алгоритм расчета сетей при переменных интенсивностях выполнения операций // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1973. № 6. С. 17—23.
15. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56—61.
16. Соколов Б. В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. МО, 1992.
17. Потрясаев С. А. Постановка и пути решения задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем // Тр. СПИИРАН. 2006. Вып. 3.
18. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
19. Павлов А. Н. Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования эксперимента // Сб. докл. XI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), Санкт-Петербург, 23—25 июня 2008 г. Т. 1. С. 169—172.
20. Sokolov B. V., Zelentsov V. A., Brovkina O., Mochalov V. F., Potryasaev S. A. Models adaptation of complex objects structure dynamics control // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Vol. 348. P. 21.

Сведения об авторе

Семен Алексеевич Потрясаев — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. науч. сотрудник;
E-mail: spotryasaev@gmail.com

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
01.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Потрясаев С. А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 913—920.

INTEGRATED MODELING OF COMPLEX PROCESSES BASED ON BPMN NOTATION**S. A. Potryasaev**

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: spotryasaev@gmail.com*

Analytical logical-dynamic models are developed for integrated modeling of complex processes and corresponding technologies. Description of a set of dynamic imitation models based on BPMN notation is presented.

Keywords: complex modeling, business processes simulation, logic-dynamic models, proactive control, integrated modeling automation

Data on author

Semyon A. Potryasaev — PhD; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Scientist;
E-mail: spotryasaev@gmail.com

For citation: *Potryasaev S. A. Integrated modeling of complex processes based on BPMN notation // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 11. P. 913—920 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-913-920