

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ СЛОЖНЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И БИЗНЕС-СИСТЕМ

М.В. Белов

В целях организации управления бизнесом предложен метод моделирования экономических характеристик больших иерархий взаимодействующих бизнес-агентов, образующих комплексную систему. Разработана совокупность математических моделей на основе концепции жизненных циклов сложных систем и теории случайных процессов. Приведен пример применения моделей для управления бизнесом компании, специализирующейся на крупных системно-интеграционных и консалтинговых проектах.

**Ключевые слова:** моделирование, экономические характеристики, сложная иерархическая система, жизненный цикл, управление бизнесом.

## ВВЕДЕНИЕ

Организация эффективного операционного и стратегического управления сложными социально-экономическими и бизнес-системами в последние годы часто опирается на концепцию управления жизненными циклами [1] сложных систем (ЖЦС). Комплексные социально-экономические и бизнес-системы и их жизненные циклы отличаются дуализмом и определенным внутренним противоречием. С одной стороны, они представляют собой сложные системы, которые могут в свою очередь состоять из систем [2], поэтому для их поведения характерны неопределенность, слабая предсказуемость и трудность управления. С другой стороны, ЖЦС — объекты бизнеса, что делает актуальной задачу численного описания эволюции ЖЦС, оценивания и прогнозирования их экономических характеристик (в том числе в рамках налогового и управленческого учета) для обеспечения эффективного управления.

Настоящая работа продолжает развитие интегрированного системно-экономического подхода к исследованию и управлению комплексными социально-экономическими и бизнес-системами. Одним из важнейших элементов контура управления такими системами является модель «технологии функционирования» [3] управляемого объекта, его деятельности и особенностей поведения, разра-

ботке такой экономико-математической модели и посвящена данная статья.

Как объект управления, ЖЦС характеризуется следующими аспектами.

А1. Современный бизнес крупных компаний связан с организацией кооперации и управлением тысячами относительно автономных бизнес-агентов [4]. Сосредоточить управление такой системой, состоящей из комплексных систем, в одном центре и организовать его в директивной парадигме невозможно. Системы управления должны охватывать всю иерархическую совокупность взаимосвязанных агентов и обеспечивать распределенное управление, направленное на достижение единых бизнес-целей. Необходимо моделировать элементы ЖЦС локально в области ответственности каждого руководителя и в то же время увязывать их друг с другом в иерархию так, чтобы выходные данные одних моделей использовались как входные для других. Это позволит в рамках каждой локальной модели оперировать обозримыми объемами данных и формировать единый результат.

А2. Рассматриваемая предметная область относится к бизнесу, экономике, деятельности людей, поэтому «точных» априорных характеристик поведения ЖЦС, основанных на физических законах или объективных измерениях, просто не существует. Вместо них приходится использовать или данные из нормативных и регламентирующих до-

кументов, или статистические оценки, или «субъективные» и «экспертные» оценки, причем последние во многих случаях бывают единственной пригодной для использования информацией о будущем поведении Системы. Как социальные системы, ЖЦС обладают существенной рефлексией, что делает субъективные экспертные оценки руководителей особенно значимыми. Таким образом, необходимо не только моделировать объект управления, но и агрегировать информацию о бизнесе в виде мнений и суждений большого числа менеджеров различных уровней.

А3. Специфика ЖЦС заключается в тесной взаимосвязи трех компонентов «треугольника жизненного цикла» [4]: информационной модели Системы, проектной программы (совокупности действий/работ) и кооперации — «расширенного предприятия». Система как предмет жизненного цикла и ее информационная модель играют центральную роль (совокупность «Система + информационная модель» будем обозначать аббревиатурой СИМ); проектная программа задает целенаправленную структуру действий, обеспечивающих эволюцию СИМ; кооперация реализует эти действия, используя трудовые, финансовые и другие ресурсы. Эволюция СИМ является первичной, а проектные программы, проекты, действия/работы и «расширенное предприятие» — вторичным обеспечением. Однако экономические характеристики ЖЦС в большей степени определяются именно действиями/работами проектной программы, в ходе которых потребляются разнородные ресурсы и создается целевая полезность/ценность.

Предлагаемая в статье система моделей ЖЦС служит формальной основой контура управления множеством взаимосвязанных бизнесов, образующих комплексную систему. Она обеспечивает накопление и агрегирование данных из информационных систем предприятий в сочетании с экспертными оценками большого числа менеджеров, отвечающих за ведение бизнеса, и принятие управленческих решений, описывает жизненный цикл как сложную систему, учитывает информацию обо всех элементах «треугольника» — эволюции СИМ, связанных/порожденных ею действий, а также фирмах-участниках кооперации. Полученные результаты базируются на практике управления бизнесом компании, специализирующейся на крупных системно-интеграционных и консалтинговых проектах [5], и применимы для широкого круга сложных социально-экономических и бизнес-систем.

## 1. ИЗВЕСТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И СМЕЖНЫЕ РАБОТЫ

Традиционно исследования жизненных циклов принадлежат теории систем и системно-инженер-

ной области. Начиная с рассмотренных в обзоре [6] работ, делались попытки еще на ранних стадиях разработки оценить Lifecycle Cost — затраты в течение всего жизненного цикла Системы. Позднее появились работы, например [7–9], основанные на применении нейронных сетей, машинного обучения и других современных подходов. Методики оценки стоимости промышленных программ являются предметом нормативных документов таких авторитетных организаций, как Национальное аэрокосмическое агентство США (NASA) [10] и Офис контроля государственных расходов США (GAO) [11].

Много исследований посвящено математическому моделированию в смежных областях:

— описанию собственно Систем, моделированию их поведения и свойств (многочисленным видам системного моделирования [12]);

— управлению проектами и проектными программами (в том числе распределению ресурсов, планированию сроков, управлению рисками проектов, например, [13, 14]);

— моделированию и исследованию фирмы (см., в частности, обзорную работу [15] и библиографию к ней);

— теории управления организационными системами (прежде всего, [3]), описывающей и изучающей широкий круг проблем, связанных с планированием, контролем, управлением структурой таких систем. В терминах данной теории совокупность предприятий, обеспечивающих ЖЦС, отвечает расширению базовой модели факторами динамики, множеством агентов, многоуровневостью, неопределенностью, ограничениями совместной деятельности и сообщения информации.

## 2. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Естественное свойство ЖЦС заключается в наличии нескольких уровней, на каждом из которых имеют место соответствующие «тройки» иерархических вложенных многоуровневых структур (СИМ; действия/работы; организационные структуры), назовем каждую из таких троек фрагментом ЖЦС (ФЖЦС), в целом ЖЦС представляется иерархией взаимосвязанных ФЖЦС (рис. 1), являющихся комплексными системами.

Каждый ФЖЦС отвечает определенному содержанию фрагменту информационной модели и/или Системы, а также соответствующим действиям/работам (проектам или проектным программам), которые выполняются «расширенным предприятием».

Жизненный цикл в целом и действия/работы каждого ФЖЦС структурируются в виде стадий и разделяющих их контрольных рубежей (КР), каждая из стадий состоит из проектов и действий/ра-

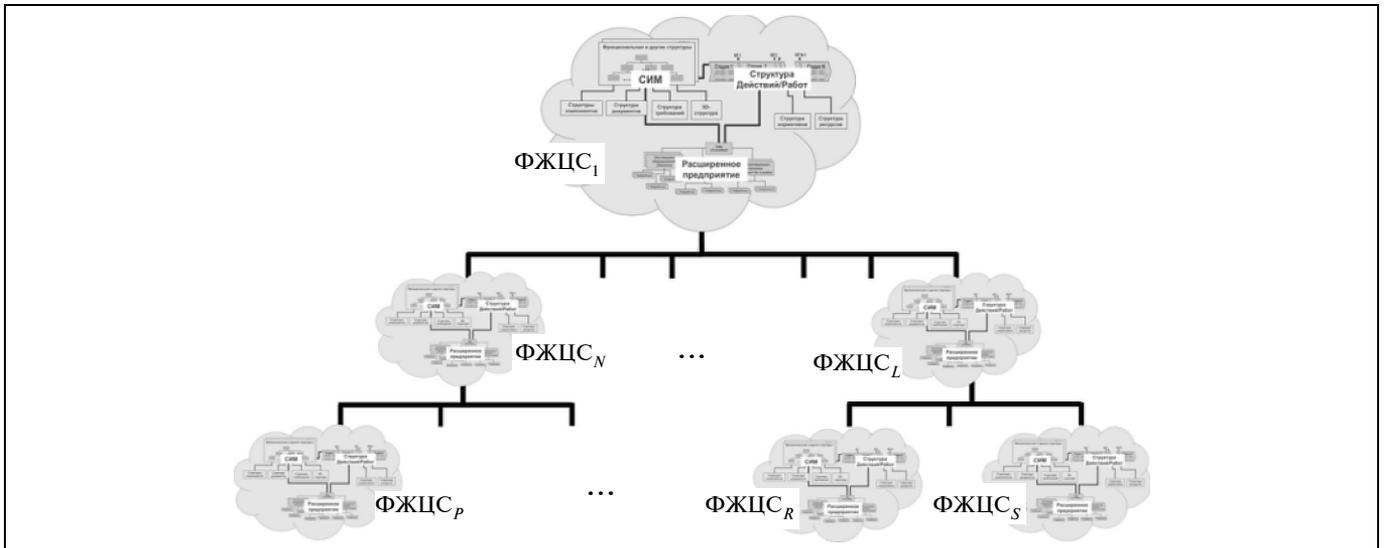


Рис. 1. Иерархия фрагментов жизненного цикла

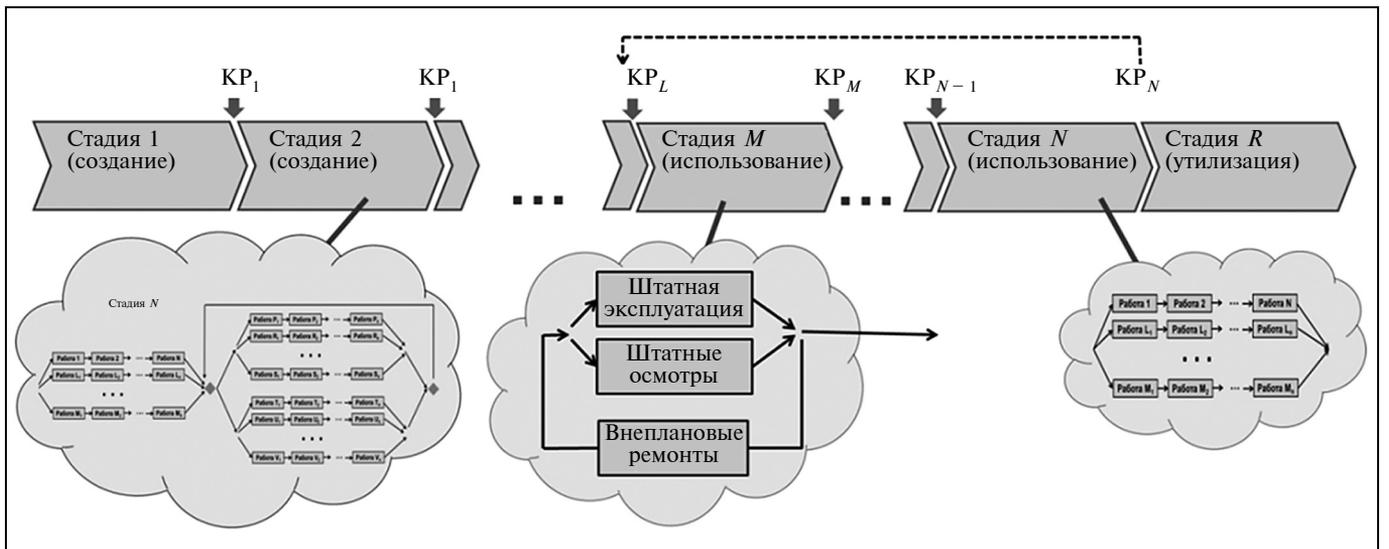


Рис. 2. Стадии ЖЦС — структура действий/работ

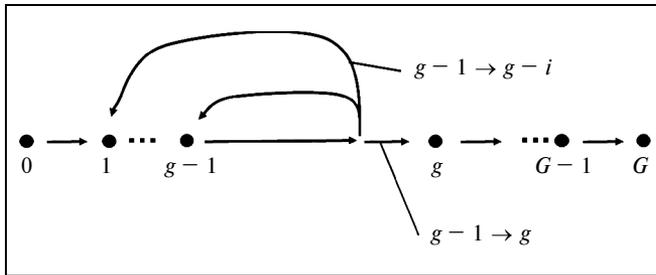
бот, выполняемых последовательно и/или параллельно (рис. 2). Контрольные рубежи отражают условия, налагаемые на СИМ для перехода от одной стадии к другой, например, завершение этапа проектирования, контроль характеристик, достижение определенного уровня зрелости, принятие решений, завершение интеграции и др.

При успешном прохождении КР планы действий/работ не изменяются, в противном случае производится возврат к предыдущим стадиям в рамках данного ФЖЦС и/или эскалация проблем на вышестоящий уровень (на ФЖЦС следующего уровня, см. рис. 1), и/или перепланирование, зна-

чимая доля повторов стадий ЖЦС отмечается, например, в работе [16].

Управление бизнесом — оценивание текущего состояния и принятие решений — осуществляется с определенной периодичностью, поэтому будем рассматривать модель с дискретным временем, понимая переменную  $t$  как номер очередного временного интервала.

Введем переменные состояния  $\alpha$ -го ФЖЦС $_{\alpha}$ . Перенумеруем все КР и стадии  $g = \{0, 1, \dots, G\}$  (см. рис. 2), в качестве переменной  $s(t)$  текущего статуса фрагмента СИМ примем номер предыдущего успешно пройденного КР. Фактическое пот-


 Рис. 3. Диаграмма переходов процесса  $x(t)$ 

ребление ресурсов в рамках ФЖЦ $_{\alpha}$  до момента завершения интервала  $t$ , включая его, будем обозначать  $r(t)$ , а  $v(t)$  — объем созданной целевой полезности/ценности, выражая их в денежном эквиваленте.

Изменения статуса ЖЦС с течением времени носят неопределенный характер, что выражается в неопределенных моментах  $t_g$  завершения стадий и прохождения КР и сроках завершения каждой из работ/действий, входящих в стадии; в неопределенном исходе прохождении КР — неопределенной функции перехода  $s(t) \rightarrow s(t+1)$ ; как следствие — в неопределенных объемах расходуемых ресурсов  $r(t)$  и создаваемой ценности  $v(t)$ .

Сформулируем **допущение Д1** о независимости в вероятностном смысле стадий ФЖЦС и составляющих их действий/работ. Внеплановые отклонения от регламентированных сроков и расходов ресурсов можно считать независимыми друг от друга: в случае выявления закономерных отклонений менеджмент корректирует соответствующие нормативы и планы, после чего отклонения от новых нормативов становятся снова статистически независимыми. Обязательность этого действия вытекает из заинтересованности руководителей как можно больше сузить неопределенность своего бизнеса. Вероятности успешного прохождения различных КР и характеристики работ/действий по той же причине являются независимыми.

С учетом допущения Д1 состояние ФЖЦС $_{\alpha}$  полностью описывается кортежем  $x_{\alpha}(t) = \langle s(t); r(t); v(t); u(t) \rangle$ , где  $s(t)$ ,  $r(t)$  и  $v(t)$  введены выше, а  $u(t)$  — время, прошедшее с момента последнего прохождения КР. Поведение процесса  $x(t)$  описывается диаграммой (рис. 3). Процесс стартует из состояния  $s(0) = 0$ . Перейдя в состояние  $g-1$ , процесс находится в нем в течение времени  $\tau$ , при этом затрачивается объем ресурса  $\psi$  и создается ценность  $\chi$ . После этого процесс переходит в состояние  $g$  (успешное прохождение КР) или происходит возврат в состояние  $g-1$  и повторное выполнение текущей стадии  $g$ , или возврат на  $i$  стадий назад и их

повторное выполнение. В финальном состоянии  $G$  процесс остается навсегда.

Адекватным с учетом изложенного представляется применение для моделирования ЖЦС стохастических подходов, слабо чувствительных к функциям распределения вероятностей и другим деталям вероятностных моделей. В рамках допущения Д1 процесс  $x(t)$  является полумарковским [17–19].

Постановка задачи может быть сформулирована как разработка системы моделей для описания и прогнозирования состояний  $x_{\alpha}(t)$  взаимосвязанной совокупности  $\alpha$ -х фрагментов ЖЦС и в целом ЖЦС (см. рис. 1) с целью оценивания момента  $t_G$  достижения терминального состояния  $G$ , расхода ресурсов  $r(t_G)$  и созданной полезности  $v(t_G)$  для всех ФЖЦС на основе информации обо всех элементах ЖЦС.

### 3. ИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА ЗАДАЧИ

Данные о ЖЦС отличаются разнородностью и различной степенью объективности и определенности, они могут быть отнесены к одной из следующих категорий:

а) переменные состояния элементов ФЖЦС, задаваемые в формате вектора  $x(t)$ ; они служат выходными/результатирующими данными для одних моделей и входными для других в силу иерархии ФЖЦС;

б) детерминированные априорные структурные данные о составе и структуре ФЖЦС, СИМ, проектов и программ, действий/работ, их взаимосвязях и вхождении;

в) неопределенные априорные структурные данные — вероятности прохождения КР и вероятности выбора альтернатив при вариантном планировании и исполнении действий/работ;

г) априорные характеристики действий/работ (длительность, расход ресурсов, создаваемая полезность), доступности и назначения ресурсов;

д) фактические данные об элементах ЖЦС.

Априорные данные (а — г) могут задаваться в виде нормативных, статистических или экспертных оценок или функций распределения (параметризованных или табличных), в частном случае — детерминированными значениями. Источниками данных служат плановые, нормативные или директивные документы предприятий и жизненных циклов, а также статистические оценки на основе исторических данных и субъективные экспертные оценки менеджеров.

Оценки целевых параметров  $t_G$ ,  $r(t_G)$ ,  $v(t_G)$  и переменных состояния  $x(t)$  (ОЦППС) и будем формировать в виде функций распределения вероятностей (ф. р. в.) или средних значений. Для представления исходных данных и результатов ОЦППС

используем форматы множественных ( $F > 1$ ) или единичных ( $F = 1$ ) сценариев поведения ЖЦС вида:  $\Sigma = \{\langle \mu_f; \sigma_f \rangle; f = 1, 2, \dots, F\}$ , где  $\mu_f$  — веса или

вероятности сценариев  $\sigma_f$  такие, что  $\sum_{f=1}^F \mu_f = 1$ .

Сценарии  $\sigma_f$  будем задавать одним из двух методов: интервальным и средних значений.

**Интервальный метод.** Сценарии задаются векторами нижних  $d_f$  и верхних  $D_f$  граничных значений элементов ОЦППС  $\Sigma = \{\langle \mu_f; d_f; D_f \rangle; f = 1, 2, \dots, F\}$ . Данный формат интерпретируется как аппроксимация ф. р. в взвешенной суммой равномерных распределений. При увеличении числа сценариев  $F$  и уменьшении расстояния между  $d_f$  и  $D_f$  формат  $\Sigma$  в пределе превращается в совместную ф. р. в случайной величины. Соотношения пересчета ОЦППС для всей совокупности ФЖЦС интервальным методом представлены в § 5.

**Метод средних.** Сценарии задаются векторами средних значений  $m_f$  ОЦППС  $\Sigma = \{\langle \mu_f; m_f \rangle; f = 1, 2, \dots, F\}$ . При увеличении  $F$  до числа точек в области возможных значений  $\Sigma$  также превращается в ф. р. в. Модели, построенные методом средних, представлены в § 6.

#### 4. СТРУКТУРА МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Учитывая рассмотренные факторы и сложную структуру компонентов жизненных циклов, воспользуемся для их описания представленной на рис. 4 системой моделей.

*Модели эволюции ФЖЦС* описывают эволюционные изменения в течение стадий ЖЦС и скачкообразные изменения статуса СИМ при прохождении КР и обеспечивают пересчет входных ОЦППС стадий в выходные оценки по ФЖЦС. Преобразование входных оценок в выходные выполняется на основе априорной информации о структуре стадий и вероятностях прохождения контрольных рубежей.

*Структурные модели* описывают связи ФЖЦС и их элементов друг с другом — параллельные, последовательные, альтернативные и иерархические структуры. Входные ОЦППС одних элементов ЖЦС преобразуются в выходные ОЦППС агрегатов элементов соответственно априорной информации о структуре агрегатов — связях и вероятностях выбора отдельных альтернатив.

*Модели терминальных действий/работ*, которые не требуют более детального представления, формируют ОЦППС таких работ на основании априорных данных, которыми служат нормативные длительности, ресурсоемкости и полезности, а также назначения/доступность ресурсов.

Система моделей применяется в контуре управления следующим образом. В каждом ФЖЦС формируются ОЦППС с максимально возможным использованием априорной и фактической информации (позиции «б—д», см. § 3), а также ОЦППС нижестоящих ФЖЦС (позиция «а», см. § 3) из информационных систем. При недостаточности данных и/или необходимости их корректировки руководитель ФЖЦС в зоне своей бизнес-ответственности вводит субъективные оценки в форме

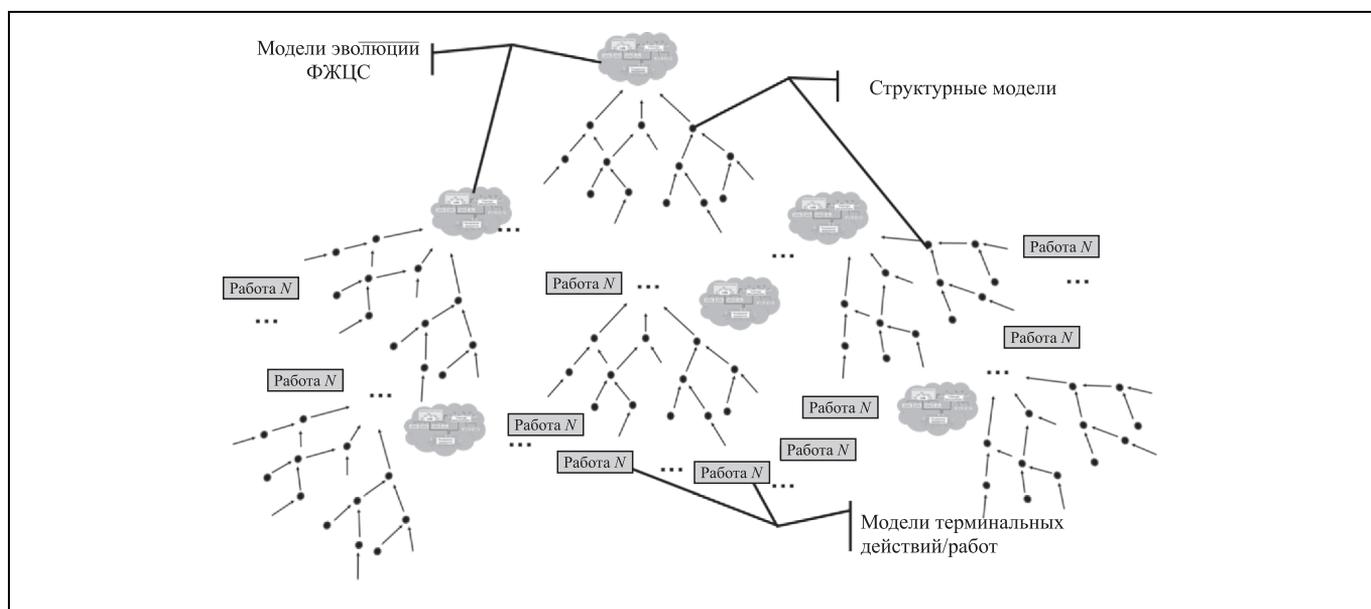


Рис. 4. Общая структура системы моделей ЖЦС

сценариев и получает уточненные ОЦППС, которые используются системой моделей в иерархии ФЖЦС.

Основное предназначение системы моделей с учетом аспектов А1—А3 (см. Введение) заключается в обоснованном агрегировании больших объемов разнородных данных о сотнях и тысячах автономных, но взаимосвязанных бизнес-объектов на базе математических формализмов и в существенно меньшей степени — в моделировании терминальных действий/работ.

### 5. МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ ПО ИНТЕРВАЛЬНОМУ МЕТОДУ

Данные модели интерпретируют сценарии как аппроксимации ф. р. в состояниях ФЖЦС и обеспечивают их вычисление.

**Модель эволюции ФЖЦС.** Обозначим ф. р. в процессе  $x(t)$ :  $p(x(t), t) = p(g, \psi, \chi, \tau, t) = \Pr(s(t) = g, r(t) = \psi, v(t) = \chi, u(t) = \tau)$ . Эволюция полумарковского процесса  $x(t)$  (см. рис. 3) определяется полумарковским ядром [17—19], опишем его в виде двух функций:

$Q(g, \tau, \psi, \chi)$  — ф. р. в. времени  $\tau$  пребывания в состоянии  $g$ , потребления ресурсов  $\psi$  и формирования ценности  $\chi$  в течение этого времени  $\tau$ ;

$k(g, i) = \Pr(s(t+1) = g-1 + i | s(t) = g-1)$  — функция переходных вероятностей, отражающая вероятности исходов прохождения  $g$ -го КР.

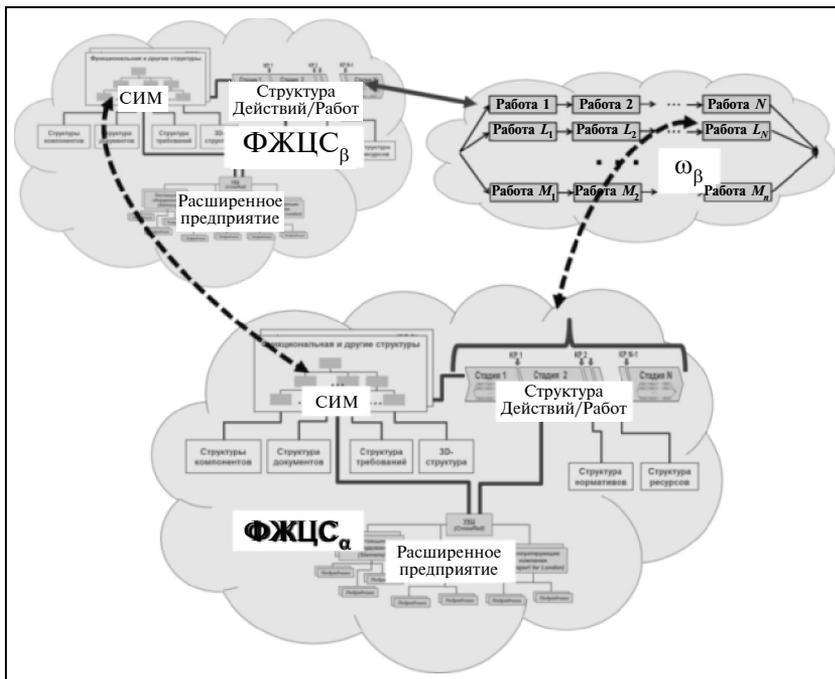


Рис. 5. Иерархические связи между действиями/работами и детализирующими их ФЖЦС

Функция  $k(\cdot)$  задается как априорная информация, функции  $Q(\cdot)$  являются выходными ОЦППС структурных моделей, которые описаны далее.

Уравнение для  $p(g, \psi, \chi, \tau, t)$  в моменты прохождения КР (смены состояний  $s(t)$ ):

$$p(g, r, v, 0, t) = \sum_{h=g-1}^{G-1} k(h, g-h) \times \sum_{\tau=1}^{t-1} \sum_{\psi, \chi} p(h, r-\psi, v-\chi, \tau, t-\tau) Q(h, \tau, \psi, \chi),$$

при  $t > 0, g \in \{0, 1, \dots, G\}$ .

Для моментов времени внутри интервалов выполнения стадий (сохранения состояний  $s(t)$ ):

$$p(g, r, v, \tau, t) = (1 - \lambda(g, r, v, \tau, t - \tau)) Q(h, \tau, \psi, \chi),$$

$$\text{где } \lambda(g, r, v, \tau - 1) = \frac{Q(g, \tau, r, v) - Q(g, \tau - 1, r, v)}{1 - Q(h, \tau - 1, r, v)}.$$

Начальные и граничные условия и условие нормирования задаются соотношениями

$$p(g, r, v, \tau, 0) = \begin{cases} 1 & \text{при } g = 0, r = 0, v = 0; \\ 0 & \text{при } g \neq 0 \text{ или при } g = 0 \\ & \text{и } r \neq 0, v \neq 0; \end{cases}$$

$$p(g, r, v, \tau, 0) \equiv 0; \text{ при } t < 0;$$

$$\sum_{g, r, v, \tau} p(g, r, v, \tau, t) = 1; \forall t > 0.$$

Функция  $p(g, r, v, \tau, t)|_{g=G, \tau=0}$  образует совместную ф. р. в. оценки момента  $t_G$  — времени достижения  $G$ -го КР, затрат ресурсов  $r(t_G)$  и формирования ценности  $v(t_G)$ , характеризующей поведение ФЖЦС, что и требовалось по постановке задачи. Эта функция является результирующей для модели ФЖЦС и используется в качестве входных данных структурных моделей и моделей ФЖЦС вышестоящих уровней иерархии.

**Структурные модели** представляют связи и отношения между элементами ЖЦС и обеспечивают интеграцию ФЖЦС в единую систему — ЖЦС.

*Модель иерархических отношений ФЖЦС* описывает случай, когда  $\alpha$ -й ФЖЦС детализирует элемент СИМ и соответствующее  $\omega_\beta$ -е действие/работу  $\beta$ -го ФЖЦС вышестоящего уровня (рис. 5). Выше показано, что  $p_\alpha(G, r, v, 0, t)$  является ф. р. в.

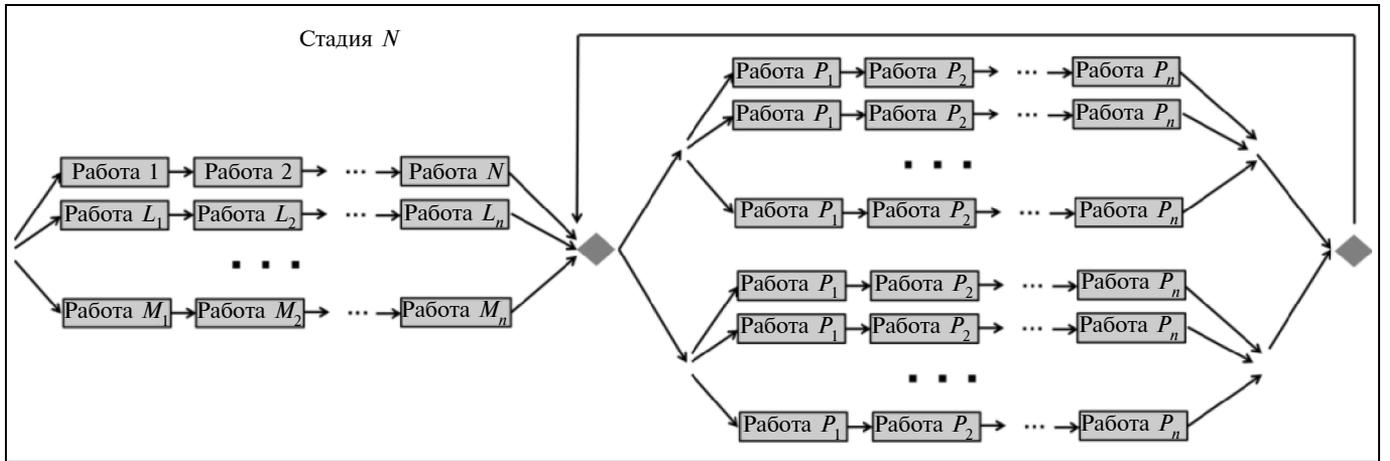


Рис. 6. Параллельно-последовательные структуры действий/работ

ОЦППС  $\alpha$ -го ФЖСИ, который соответствует  $\omega_\beta$ -й работе, поэтому

$$q_{\omega_\beta}(t, r, v) = p_\alpha(G, r, v, \theta, t). \quad (1)$$

Модель последовательности действий/работ (рис. 6) в силу допущения Д1 (см. § 2) о статистической независимости является сверткой ф. р. в. действий/работ, составляющих последовательность:

$$\tilde{q}_L(\theta, r, v) = q_{L_1}(\theta, r, v) * q_{L_2}(\theta, r, v) \cdot \dots \cdot q_{L_l}(\theta, r, v)$$

$$\theta_L = \sum_{i=1}^l \theta_{L_n}, \quad r_L = \sum_{i=1}^l r_{L_n}, \quad v_L = \sum_{i=1}^l v_{L_n}. \quad (2)$$

Модель альтернативно выполняемых действий/работ или цепочек (например, агрегат в виде альтернатив  $N, L, M$  или  $P, R, \dots, V$ , см. рис. 6) вычисляется как

$$\tilde{q}_{\text{агрегата}}(\theta, r, v) = \sum_{i \in \{N, L, M\}} \pi_i q_i(\theta, r, v),$$

где  $\pi_i$  — вероятность выполнения  $i$ -й цепочки, а  $q_i(\theta, r, v)$  — ф. р. в.  $i$ -й цепочки.

Модель объединения параллельных последовательностей действий/работ описывает случай, когда необходимо завершение всех действий, поэтому ф. р. в. агрегата выразится как композиция ф. р. в.

$\tilde{q}_{N_i}(\theta, r, v)$  всех параллелей:

$$\tilde{q}_{\text{объед}}(\theta, r, v) = \tilde{q}_{N_1}(\theta, r, v) \cdot \tilde{q}_{N_2}(\theta, r, v) \cdot \dots \cdot \tilde{q}_{N_L}(\theta, r, v);$$

$$\theta_{\text{эл}} = \max_{1 \leq l \leq L} \{\theta_{N_l}\}, \quad r_{\text{эл}} = \sum_{l=1}^L r_{N_l}, \quad v_{\text{эл}} = \sum_{l=1}^L v_{N_l}. \quad (3)$$

Отличие композиции (3) от свертки (2) заключается в том, что случайные размеры ресурсов  $r$  и ценностей  $v$  суммируются по всем цепочкам  $N_i$ , а из случайных величин  $\theta$  берется максимальное значение. Композиция для пары действий/работ выражается как

$$\begin{aligned} & \Pr(\max(\theta_1, \theta_2) \leq \theta, r_1 + r_2 \leq r, v_1 + v_2 \leq v) = \\ & = \sum_{y=0}^r \sum_{z=0}^v \Pr(\theta_1 \leq \theta, r_1 \leq y, v_1 \leq z) \times \\ & \times \Pr(\theta_2 \leq \theta, r_2 \leq r - y, v_2 \leq v - z). \end{aligned}$$

**Модель терминальных действий/работ.** Как отмечено в § 4, данные модели играют вспомогательную роль, потому что часто ОЦППС терминальных действий/работ  $q_\omega(\theta, r, v)$  задаются руководителями ФЖЦС непосредственно в форме сценариев  $\Sigma = \{\langle \mu_f; d_f, D_f \rangle; f = 1, 2, \dots, F\}$  со значениями  $\mu_f, d_f, D_f$  в виде экспертных оценок. Также для получения ОЦППС на основе нормативных трудоемкостей, затрат ресурсов и создаваемой полезности, а также доступности/назначения ресурсов могут использоваться соотношения (ПЗ) (см. Приложение).

## 6. МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ ПО МЕТОДУ СРЕДНИХ

Метод средних интерпретирует сценарии как взвешенную совокупность средних значений векторов характеристик, поэтому выражения получены в основном в виде линейных моделей.

**Модель ФЖЦС.** Рассмотрим задачу оценивания средних значений величин  $t_G, r(t_G)$  и  $v(t_G)$  как задачу вычисления веса пути в графе (см. рис. 3) из нулевой вершины в терминальную  $G$ . Соответственно семантике ФЖЦС ребра графа из  $(g - 1)$ -х

вершин в  $g$ -е имеют веса  $z_g$ , являющиеся статистически независимыми многомерными случайными величинами. Веса остальных ребер соответствуют возвратам к предыдущим стадиям ФЖЦС (из  $g$ -й вершины в  $(g-i)$ -ю, где  $0 \leq i < g$ ), и равны нулю.

Пусть  $\Pi_g$  — вес пути из  $g$ -й вершины в терминальную  $G$ -ю, все  $\Pi_g$  являются случайными величинами той же размерности, что и  $z = (\theta, r, v)^T$ , тогда:

$$\Pi_g = z_g + \sum_{i=-g}^0 k(g, i) \Pi_{g+1}, \quad 0 \leq g < G, \quad \Pi_G = 0. \quad (4)$$

Отсюда следует, что веса  $\Pi_g$  являются линейными комбинациями  $z_g$ , получим выражения для них. Обозначим вектор  $\Pi = (\Pi_0, \Pi_1, \dots, \Pi_{G-1})^T$ , тогда выражение (4) позволяет записать для него матричное уравнение:  $\Pi = Z + K\Pi$ , где  $Z = (z_0, z_1, \dots, z_{G-1})^T$ ,

$$K = \begin{pmatrix} k(0,0) & k(0,1) & 0 & 0 & \dots & \dots \\ k(1,-1) & k(1,0) & k(1,1) & 0 & \dots & \dots \\ k(g,-g) & k(g,i) & k(g,0) & k(g,1) & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k(G-1,1-G) & & & & & k(G-1,0) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Уравнение (5) допускает решение вида

$$\Pi = (I - K)^{-1}Z. \quad (6)$$

Тогда вес пути  $\Pi_0$  из 0-й вершины в терминальную  $G$  определяется как

$$\Pi_0 = \sum_{g=1}^G n_{0,g} z_g, \quad (7)$$

где  $n_{i,j}$  — элемент  $i$ -й строки  $j$ -го столбца матрицы  $(I - K)^{-1}$ .

Существование решения (6) и возможность получения соотношения (7) достаточно просто доказывается методом математической индукции через возможность исключения из системы (4) всех неизвестных  $\Pi_i$ , кроме  $\Pi_0$ , последовательно выражая  $\Pi_i$  через  $\Pi_0$  и  $z_i$ .

Соотношение (7) определяет средние характеристики ФЖЦС через средние значения стадий  $m_g$ :

$$m_{\text{ФЖЦС}} = \sum_{g=1}^G n_{0,g} m_g. \quad (8)$$

Пусть задано  $F - 1$  значимых сценариев, каждый из которых представляет собой последовательность стадий. Как правило, в качестве таких

сценариев выбирается последовательность, включающая в себя однократное прохождение каждой из стадий, и также несколько последовательностей с одним-двумя повторами отдельных стадий. Вероятности каждого из значимых сценариев равны произведениям соответствующих  $k(\cdot)$ :

$$\mu_f = \prod_{l=1}^{L_f} k(g_l, i_l), \quad (9)$$

где  $g_l$  принимают значения всех стадий, входящих в сценарий-последовательность,  $i_l = g_{l+1} - g_l$ ,  $L_f$  — число стадий в последовательности.

Средние значения сценариев:

$$m_f = \sum_{l=1}^{L_f} m_{g_l}. \quad (10)$$

Вероятность дополняющего сценария

$$\mu_F = 1 - \sum_{f=1}^{F-1} \mu_f. \quad (11)$$

Среднее значение дополняющего сценария

$$m_F = \mu_F^{-1} \left( m_{\text{ФЖЦС}} - \sum_{f=1}^{F-1} \mu_f m_f \right). \quad (12)$$

**Структурные модели интеграции элементов ЖЦС.** Модель иерархических связей в терминах средних полностью аналогична (1)  $\Sigma_{\omega\beta} = \Sigma_\alpha$ .

При использовании единственных сценариев остальные модели определяются следующими соотношениями:

Модель цепочки последовательно выполняемых действий/работ получается прямым суммированием средних значений аналогично выражению (2):  $m_N = \sum_i \tilde{m}_{N_i}$ , где  $\tilde{m}_{N_i}$  — средние значения элементов цепочки, приведенные к виду единственного сценария.

Модель альтернативных действий/работ (средние значения  $m_i$  и вероятности  $\pi_i$  для  $i = 1, 2, \dots, I_a$ ) получаются как взвешенная сумма средних значений:

$$m_a = \sum_{i=1}^{I_a} \pi_i m_i.$$

Модель объединения нескольких  $N_i$ -х цепочек в  $g$ -ю стадию ФЖЦС получается выбором максимального значения из  $m[\theta_{N_i}]$  и прямым суммированием  $m[r_{N_i}]$  и  $m[v_{N_i}]$ :

$$m[\theta_g] = \max_{1 \leq l \leq L} \{m[\theta_{N_l}]\}, \quad m[r_g] = \sum_{l=1}^L m[r_{N_l}],$$

$$m[v_g] = \sum_{l=1}^L m[v_{N_l}].$$



Если некоторые элементы цепочек представлены несколькими сценариями и различия сценариев значимо влияют на результат стадии в целом, многосценарное представление цепочки может быть сформировано аналогично соотношениям (8)–(12).

**Модель терминальных действий/работ.** Для терминальных действий/работ ОЦППС также задаются руководителями ФЖЦС непосредственно в форме сценариев  $\Sigma = \{\langle \mu_f; m_f \rangle; f=1, 2, \dots, F\}$  со значениями  $\mu_f$  и  $m_f$  в виде экспертных оценок. Соотношения (П4) — см. Приложение — также пригодны для получения ОЦППС на основе нормативных трудоемкостей, затрат ресурсов и создаваемой полезности, а также доступности/назначения ресурсов могут использоваться.

## 7. ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим практическое использование разработанной модели на конкретных примерах управления компанией ИБС [4, 5], для управления которой была разработана система моделей ЖЦС, построенных по методу средних.

Бизнес Компании связан с оказанием профессиональных услуг и структурирован в виде проектов по типам сервисов, объединяемых в линии бизнеса, а в другом разрезе — по индустриям клиентов и клиентам. Вся деятельность Компании представляется в виде проектов как удобной для управления формы действий. Были определены следующие виды проектов:

- коммерческий — проект, осуществляемый как исполнение обязательств по договору с заказчиком;

- пресейл-проект — организованная сбытовая деятельность, направленная на заключение коммерческого договора с заказчиком;
- маркетинговый — организованная деятельность, направленная на развитие коммерческих отношений с заказчиком или продвижение сервисов или продуктов Компании;
- инвестиционный — проект, направленный на разработку новых сервисов, продуктов или иных технологических заделов, используемых в будущих коммерческих проектах.

Для управления бизнесом внутри Компании выделяются центры ответственности (ЦО) разных видов и длительности существования, которые рассматриваются как предприятия — комплексные системы. Основные виды ЦО и их ЖЦС, учитываемые как объекты управления Компанией, перечислены в таблице.

Центры ответственности всех типов проходят следующие стадии жизненных циклов:

- предварительная, цель которой — определить бизнес-перспективы ЦО;
- подготовка и формирование бизнеса, цель — создать инфраструктуру ЦО;
- коммерческая, цель — реализовать бизнес-возможности и получить финансовый результат;
- закрытие, цель — накопить и сохранить опыт и знания.

Отметим, что ЦО отвечают определению предприятия [20], соответствуют ФЖЦС и структурируются на ФЖЦС нижестоящих уровней (например, отраслевые подсистемы в составе создаваемой системы и соответствующие подпроекты отраслевых рабочих групп внутри рабочей группы проекта в целом), пример приведен на рис. 7.

**Основные виды центров ответственности и их ЖЦС**

Обозначение	Содержание
ЖЦС-ПКП	Последовательность связанных пресейл-проектов и соответствующих коммерческих проектов (ПКП)
ЖЦС-С	Сервис определенного вида. Представляет собой совокупность инвестиционных проектов и множество $ПКП_1, \dots, ПКП_N = \langle \text{Инвестиционные проекты} + ПКП_1, \dots, ПКП_N \rangle$
ЖЦС-ЛБ	Линия бизнеса (группы технологически близких сервисов): $\langle \text{Инвестиционные проекты} + ПКП_1, \dots, ПКП_N \rangle$
ЖЦС-КК	Группы проектов, относящихся к отдельным крупным клиентам (КК): $\langle \text{Маркетинговые проекты} + ПКП_1, \dots, ПКП_N \rangle$
ЖЦС-И	Группы проектов, относящихся к определенным индустриям клиентов: $\langle \text{Маркетинговые проекты} + ПКП_1, \dots, ПКП_N \rangle$

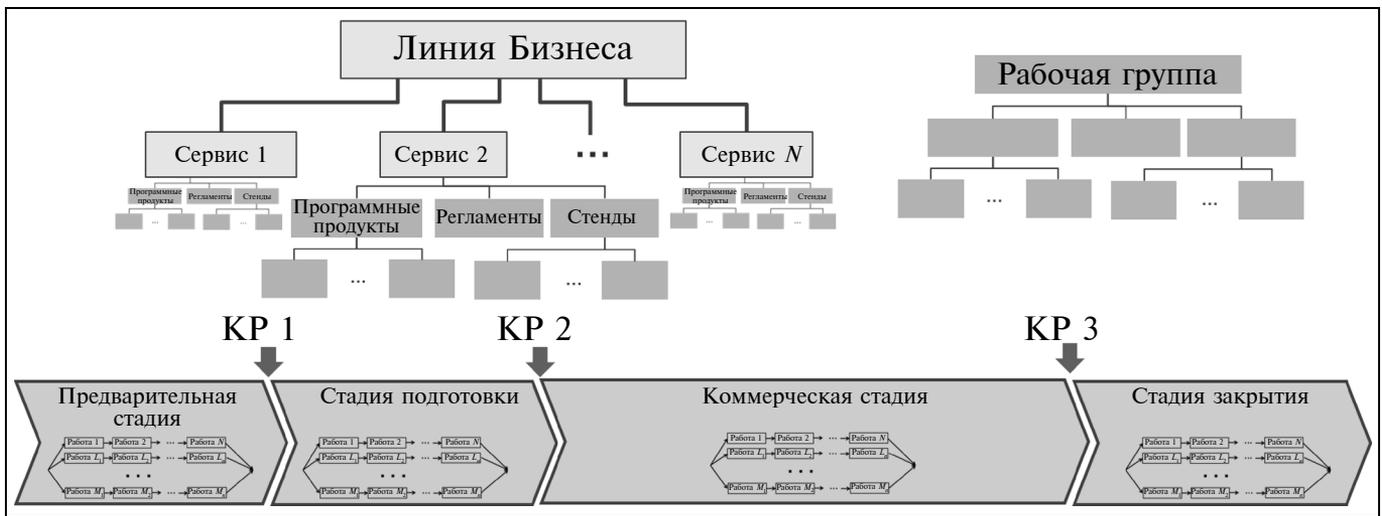


Рис. 7. Пример ФЖЦС, соответствующего линии бизнеса

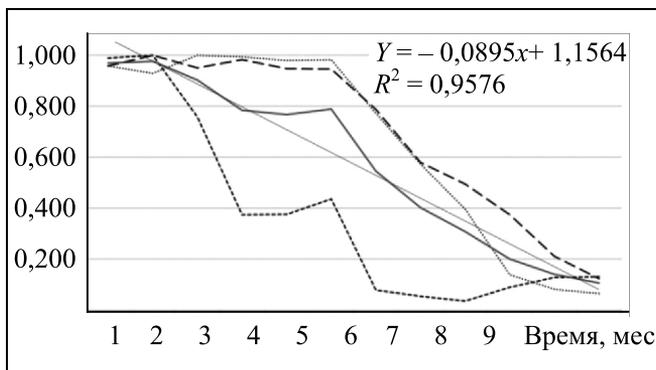


Рис. 8. Пример графиков изменения расхождения прогноза и факта, линия бизнеса 1

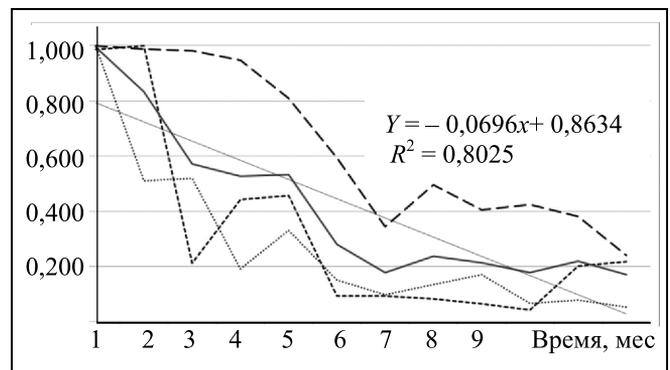


Рис. 9. Пример графиков изменения расхождения прогноза и факта, линия бизнеса 2

Компания одновременно реализует несколько сотен коммерческих проектов (например, в апреле 2014 г. их было 750, а в сентябре 2015 г. — 790), соответственно постоянного управления требуют несколько тысяч ЦО, каждый ЦО-ФЖЦС управляется руководителем, который несет ответственность за результаты бизнеса соответствующего ЦО.

Компания как бизнес-система обладает естественной инерционностью, поэтому основным принципом управления Компанией является «прогноз против плана», заключающийся в том, что решения принимаются на основе сопоставления прогноза бизнес-результатов с планом, что позволяет осуществлять действительно проактивное управление. Осуществляется прогнозирование и оценивание экономических и временных характеристик ФЖЦС: затраты и доходы, время завершения стадий. Для реализации этого подхода точность прогноза весьма критична.

На основе накопленных более чем за 10 лет исторических данных был выполнен апостериорный анализ точности прогнозов. Сопоставлены прогнозы экономических характеристик ЦО с фактическими данными в зависимости от горизонта прогнозирования — финансового результата за год для двух линий бизнеса на коммерческой стадии ЖЦ. Примеры зависимостей расхождения прогнозных значений и фактических приведены на рис. 8 и 9.

Графики представляют изменение расхождения прогноза и факта в зависимости от номера месяца, когда сделан прогноз (по горизонтали). В начале первого месяца года интервал прогнозирования составляет 12 мес и уменьшается до одного месяца к началу 12-го месяца года, соответственно убывает погрешность прогноза. На каждом из графиков изображено изменение расхождений для трех различных лет (штриховые и пунктирные линии), ус-

реденный график (сплошная линия) и линейный тренд (тонкая сплошная линия).

Финансовый результат рассчитывался как разность между полученной реализацией и затратами  $\alpha = \sum (v_{\text{ФЖЦС}_i} - r_{\text{ФЖЦС}_i})$  для всех ФЖЦС, относящихся к данной линии бизнеса. Для приведения к единому масштабу расхождения были нормированы как  $(\max_t \{|\alpha_t - \alpha_{\text{факт}}|\})^{-1} \cdot |\alpha_t - \alpha_{\text{факт}}|$ , где  $\alpha_{\text{факт}}$  — фактическое значение финансового результата по итогам года,  $\alpha_t$  — прогнозное значение, сформированное на  $t$ -м месяце года.

Результаты сравнения подтвердили принятые в ходе разработки модели предположения и продемонстрировали эффективность применения модели как инструмента управления Компанией.

В частности, для всех ЦО расхождение уменьшается с уменьшением горизонта прогнозирования и прогнозы не имеют систематических ошибок. Из уравнений линий тренда на графиках видно, что линейная модель уменьшения расхождений является адекватной (высокие значения достоверности аппроксимации  $R^2$ ). Далее, линия тренда пересекает ось времени в точках от 12,4 до 13 мес, т. е. среднее значение расхождения становится нулевым около точки 13, что соответствует концу 12-го месяца и интервалу прогноза, равному нулю.

С одной стороны, это ожидаемый вывод: с уменьшением горизонта прогнозирования неопределенность естественным образом уменьшается. С другой стороны, данный результат сам по себе подтверждает отсутствие систематических ошибок в модели. Включение руководителей ЦО в информационный контур делает прогноз и управление ЦО в целом рефлексивным. Уменьшение погрешностей и отсутствие систематических ошибок показывает устойчивость модели к рефлексии в контуре (руководитель — управляемый ЦО).

Относительные погрешности прогноза  $(\alpha_{\text{факт}})^{-1} \cdot |\alpha_t - \alpha_{\text{факт}}|$  не превышают 10...12 % на трехмесячном горизонте и 40...50 % на полугодие, что можно считать достаточно хорошим результатом. Вместе с тем, анализируемой системе свойственна достаточно существенная неопределенность, являющаяся естественной особенностью бизнеса и вызванная наличием отдельных сделок с высокой неопределенностью.

На рис. 10 приведены примеры прогнозов финансовых результатов нескольких проектов в зависимости от времени (по месяцам), прогнозы нормированы, аналогично графикам, представленным на рис. 8 и 9. Наличие волатильных проектов (см. рис. 10) хорошо согласуется с линейным

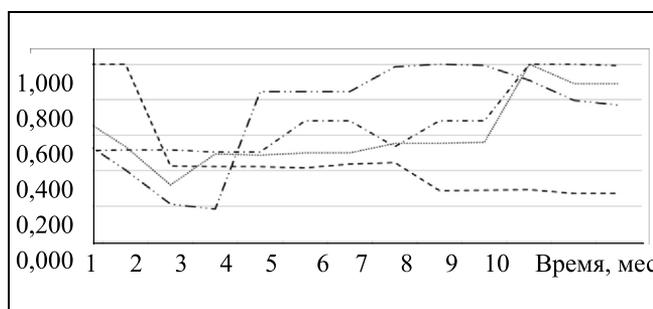


Рис. 10. Пример изменения прогнозов финансовых результатов нескольких проектов

уменьшением расхождений прогноза и факта: в течение каждого месяца завершается примерно одинаковое число проектов, по завершённым проектам прогнозные значения заменяются на фактические, и неопределенность пропорционально уменьшается.

Система управления, основанная на предложенной модели, включает руководителей ЦО и других сотрудников Компании в контур обработки информации и требует от них определенных трудозатрат, совокупные издержки Компании на поддержание и эксплуатацию системы управления составляют не более 5 % от затрат на персонал, что представляется весьма адекватной величиной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях современной «экономики знаний» и возрастания роли информации вообще предложенные подходы и методы представления жизненного цикла могут быть распространены на другие виды бизнеса. Операционную деятельность практически любых предприятий (договоры, сделки, проекты, бизнес-активности и пр.) справедливо описывать иерархиями совокупностей (информационная модель + структура действий/работ + структура организаций). Поэтому предложенный в работе формализм и соответствующие стохастические модели являются универсальным средством описания и анализа операционной части бизнеса и экономики в целом. В дальнейшем целесообразно проанализировать различные отрасли экономики и бизнеса — страховой и финансовый сектор, профессиональные услуги, розничную торговлю, коммунальный сектор, правительственные и некоммерческие организации, выделить их специфические особенности и при необходимости создать набор операционных моделей для различных индустрий и направлений бизнеса.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**Модели терминальных действий/работ.** Рассмотрим процесс выполнения  $\omega$ -х терминальных действий/работ для получения ОЦППС в форматах  $q_\omega(\theta, r, v)$  для интервального метода и вектора средних значений  $m_\omega$  для метода средних соответственно. Индекс  $\omega$ , отражающий номер работы, будем опускать, когда это не приводит к неоднозначному пониманию. В рамках Приложения среди всех видов ресурсов будем отдельно учитывать трудоемкость, как наиболее сильно влияющую на сроки выполнения работ. Введем обозначения:  $\hat{j}$  — нормативная (плановая) трудоемкость;  $j(t)$  — фактическая трудоемкость, выполненная к моменту  $t$ ;  $r^*(t) = r(t) - j(t)$  — фактическая ресурсоемкость (за вычетом трудоемкости), затраченная к моменту  $t$ ;  $v(t)$  — объем ценности аналогично.

Динамика действия/работы в общем виде описывается системой соотношений

$$\begin{aligned} j(t) &= j(t-1) + a(j(t-1), H(t), t-t_0); \\ r^*(t) &= r^*(t-1) + b(j(t-1), r^*(t-1), H(t), t-t_0); \\ v(t) &= v(t-1) + c(j(t-1), r^*(t-1), v(t-1), H(t), t-t_0); \\ j(t_0) &= 0; \\ r^*(t_0) &= r_0; \\ v(t_0) &= 0. \end{aligned} \quad (\text{П1})$$

Работа выполняется с момента ее начала  $t_0$  до достижения нормативной (плановой) трудоемкости, т. е. пока  $j(t) < \hat{j}$ . Функции производительности  $a(\cdot)$ ,  $b(\cdot)$  и  $c(\cdot)$  зависят от текущих значений  $j$ ,  $r^*$  и  $v$ , от текущей продолжительности работы от момента ее начала  $t - t_0$ , и от параметра  $H(t)$  — текущей доступности/назначения, необходимых для выполнения работы ресурсов (специалистов требуемой квалификации, оборудования, материалов, комплектующих и др.). В общем случае для старта работы необходимы начальные затраты ресурсов  $r_0$ . С учетом соображений о неопределенности

нормативная трудоемкость  $\hat{j}$  и начальные затраты  $r_0$  описываются известной ф. р. в.  $\rho_{jr}(\hat{j}, r_0)$ , задаваемой в параметрическом виде или как выборочная гистограмма. Функции производительности  $a(\cdot)$ ,  $b(\cdot)$  и  $c(\cdot)$  известны или из регламентирующих документов (например, технологических карт) для типовых работ, или задаются экспертно для редко выполняемых работ.

Доступность  $H(t)$  для различных работ моделируется функциями различных видов, например:

— параметр  $H(t)$  бинарен и принимает значения  $\{1; 0\}$ , отражающие случаи «ресурсы доступны в требуемом объеме, работа может выполняться» или «ресурсы недоступны, работа не выполняется»;

— параметр  $H(t)$  принимает значения процента доступности ресурсов и работа выполняется с пропорциональной производительностью.

В рамках данной статьи вопрос управления не рассматривается, будем считать, что известно расписание доступности ресурсов или характеристики случайного процесса  $H(t)$ .

Соотношения (6) в общем виде сложны для аналитического или даже численного решения, однако в большинстве практически важных случаев допускают существенные упрощения и позволяют получить выражения, пригодные для инженерных расчетов, рассмотрим их.

**Интервальная модель терминальных действий/работ.**

Ф. р. в.  $\rho_{jr}(\hat{j}, r_0)$  обычно допускает аппроксимацию  $\rho_{jr}(j, r) = \rho_j(j - \hat{j}_{\text{центр}})\rho_r(r - r_{\text{центр}})$  как следствие допущения Д1, где  $\rho_j(\cdot)$  и  $\rho_r(\cdot)$  — простые параметризуемые ф. р. в., например, линейные или  $\beta$ -распределения.

Функции производительности часто могут быть (кусочно) линеаризованы:

$$\begin{aligned} a(j(t-1), H(t), t-t_0) &= a_0 h(t); \\ b(j(t-1), r^*(t-1), H(t), t-t_0) &= \\ &= \{b_0 + b_j j(t-1) + \xi(t)\} h(t); \\ c(j(t-1), r^*(t-1), v(t-1), H(t), t-t_0) &= \\ &= \{c_0 + c_j j(t-1) + c_r r^*(t-1) + \zeta(t)\} h(t), \end{aligned}$$

где  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $b_j$ ,  $c_0$ ,  $c_j$  и  $c_r$  — известные константы, а  $\xi(t)$  и  $\zeta(t)$  — марковские процессы с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_\xi^2$  и  $\sigma_\zeta^2$ , отражающие неопределенность затрат ресурсов и создаваемой ценности соответственно. Параметры ф. р. в.  $\rho_j(\cdot)$  и  $\rho_r(\cdot)$ , константы  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $b_j$ ,  $c_0$ ,  $c_j$  и  $c_r$ , дисперсии  $\sigma_\xi^2$  и  $\sigma_\zeta^2$  имеют вполне определенную бизнес-семантику и могут быть получены из регламентов работ, технологических карт или заданы экспертно. Тогда продолжительность работы, затраты ресурсов и созданная ценность определяются как

$$\begin{aligned} \theta &= \hat{j}/a_0 + \delta_H; \\ r^* &= r_0 + b_0 + b_j \hat{j} + \sum_{i=1}^{\hat{j}/a_0} \xi(i); \quad r = r^* + \hat{j}; \\ v &= c_0 + c_j \hat{j} + c_r r^* + \sum_{i=1}^{\hat{j}/a_0} \zeta(i), \end{aligned} \quad (\text{П2})$$

где  $\delta_H$  определяется поведением  $h(t)$  в течение длительности работы и в разных случаях может быть известной детерминированной или случайной величиной. Обозначим  $\tilde{\xi} = \sum_{i=1}^{\hat{j}/a_0} \xi(i)$  и  $\tilde{\zeta} = \sum_{i=1}^{\hat{j}/a_0} \zeta(i)$ . Тогда  $q_\omega(\theta, r, v)$  может

быть аналитически получена как композиция  $\rho_j(\cdot)$ ,  $\rho_r(\cdot)$ ,



$\rho_\delta(\cdot)$ ,  $\rho_\xi(\cdot)$  и  $\rho_\zeta(\cdot)$  — ф. р. в. соответствующих величин  $\hat{j}$ ,  $r_0$ ,  $\delta_H$ ,  $\xi$  и  $\zeta$ :

$$q_\omega(\theta, r, v) = \sum_{j,x} \rho_j(j) \rho_r(x) \rho_\delta(\theta - j/a_0) \times \\ \times \rho_\xi(r - j - b_0 - b_j j - x) \rho_\zeta(v - c_0 c_j j - c_r(r - j)). \quad (\text{П3})$$

Выражения (7)–(9) достаточны для получения приближенных оценок характеристик действий/работ. При выполнении более точных расчетов необходимо учитывать такие эффекты, как использование одних и тех же ресурсов (проектных команд, специалистов, оборудования) в разных ФЖЦС разных действий/работ, что требует расчета ф. р. в. на основании уравнений (П1) для всей совокупности терминальных работ всех фрагментов ЖЦС. В силу размерности ни аналитическое, ни численное вычисление в таких случаях невозможно, поэтому целесообразно воспользоваться имитационным моделированием методом Монте-Карло.

**Модель терминальных действий/работ по методу средних.** Соотношения (П2) допускают матричное представление:

$$z = A\varepsilon + B,$$

где  $\varepsilon = (\hat{j}, r_0, \delta_H, \xi, \zeta)^T$

$$A = \begin{pmatrix} 1/a_0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 + b_j & 1 & 0 & 1 & 0 \\ c_j + c_r b_j & c_r & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B = (0, b_0, c_0 + c_r b_0)^T.$$

Все элементы векторов средних значений  $\varepsilon$ , матрицы  $A$  и вектора  $B$  неотрицательны. Эти величины имеют вполне определенную бизнес-семантику и могут быть получены из регламентов работ, технологических карт или заданы экспертно.

Тогда вектор средних значений  $m_\omega$  характеристик  $\omega$ -й работы определится как:

$$m_\omega = Am_\omega + B, \quad M_\omega = AM_\omega + B.$$

Соответственно, сценарии терминального действия/работы:

$$\Sigma_\omega = \{\mu_f; Am_f + B; f = 1, 2, \dots, F\}. \quad (\text{П4})$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Product Lifecycle Management (PLM) Definition* — URL: <https://www.cimdata.com/en/resources/about-plm> (дата обращения: 22.05.2015).
2. *SEBoK Glossary. System of Systems (SoS) (glossary)*. — URL: [http://sebokwiki.org/wiki/System\\_of\\_Systems\\_\(SoS\)\\_glossary](http://sebokwiki.org/wiki/System_of_Systems_(SoS)_glossary) (дата обращения: 23.06.2015).
3. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. 3-е изд. — М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. — 604 с.
4. *Белов М.В.* Системно-инженерные и экономические аспекты управления жизненным циклом // *Управление большими системами*. — 2015. — Вып. 56. — С. 6–65.
5. *Belov M.* IBS Group, Eastern European IT Services: Capability-Based Development for Business Transformation. In: *Case Studies in System of Systems, Enterprises, and Complex Systems Engineering / A. Gorod, B. White, V. Ireland, J. Gandhi, and B. Sauser (eds.)*. — N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis, 2014. — 808 p.
6. *Gupta Y. and Chow W.S.* Twenty-five years of life cycle costing theory and application: a survey // *The Intern. Journal of Quality and Reliability Management*. — 1985. — Vol. 2. — P. 51–76.
7. *Loyer J.L., Henriques E.* A MBSE probabilistic framework for preliminary lifecycle costing of mechanical products. *INCOSE International Symposium, Las Vegas, NV, June 30–July 3, 2014*. — Vol. 24, iss. 1. — P. 182–195.
8. *Wang G., Roedler G.J., Pena M., Valerdi R.* A Generalized Systems Engineering Reuse Framework and Its Cost Estimating Relationship // *INCOSE International Symposium Las Vegas, NV, June 30–July 3, 2014*. — Vol. 24, iss. 1. — P. 274–297.
9. *Liu H., Gopalkrishnan V., Ng W.K., Song B., and Li X.* An intelligent system for estimating full product Life Cycle Cost at the early design stage // *Intern. Journal of Product Lifecycle Management*. — 2008. — N 2 (2–3). — P. 96–113.
10. *NASA Cost Estimating Handbook. Version 4.0.* NASA Headquarters — Cost Analysis Division. — Washington, DC (US): National Aeronautics and Space Administration, February 2015.
11. *GAO Cost Estimating and Assessment Guide. Best Practices for Developing and Managing Capital Program Costs.* GAO-09-3SP. United States Government Accountability Office. — Washington, D.C., March 2009.
12. *Estefan J.* INCOSE Survey of MBSE Methodologies. INCOSE-TD-2007-003-02 May 2008 INCOSE 2150 N. 107th Street, Suite 205 Seattle, WA 98133-9009. [http://www.omgsysml.org/MBSE\\_Methodology\\_Survey\\_RevB.pdf](http://www.omgsysml.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf) (дата обращения: 10.12.2015).
13. *Голенко-Гинзбург Д.И.* Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: Монография. — Воронеж: Научная книга, 2010. — 284 с.
14. *Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В.* Модели и методы управления портфелями проектов. — М.: ИПУ РАН, 2005.
15. *Клейнер Г.Б.* Эволюция и модернизация теории предприятия // *Экономическая трансформация и экономическая теория. 5-й Междунар. симпозиум по эволюционной экономике*. — М., 2004.
16. *Braha, D., Yaneer, B.-Y.* The statistical mechanics of complex product development: Empirical and analytical results // *Management Science*. — 2007. — Vol. 53, N 7. — P. 1127–1145.
17. *Беляев Ю.К.* Линейчатые марковские процессы и их приложение к задачам теории надежности // *Тр. VI Всесоюзного совещания по теории вероятностей и математической статистике*. — Вильнюс, 1962. — С. 309–323.
18. *Королюк В.С., Броди С.М., Турбин А.Ф.* Полумарковские процессы и их применения. *Итоги науки и техники // Сер.: Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет.* — 1974. — Т. 11. — С. 47–97.
19. *Харламов Б.П.* Непрерывные полумарковские процессы. — М.: Наука, 2001. — 418 с.
20. *SEBoK Glossary. Enterprise (glossary)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://sebokwiki.org/wiki/Enterprise\\_\(glossary\)](http://sebokwiki.org/wiki/Enterprise_(glossary)) (дата обращения: 23.06.2015).

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневским.*

**Белов Михаил Валентинович** — канд. техн. наук, зам. ген. директора, Компания ИБС, г. Москва, ✉ [mbelov59@mail.ru](mailto:mbelov59@mail.ru).