

*Д. В. Исаев, канд. экон. наук, доцент, Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», г. Москва, disaev@hse.ru*

Моделирование программ развития с вероятностными параметрами и неявными экономическими выгодами

Статья посвящена вопросам анализа программ развития сложных организационно-технических систем, отличительной особенностью которых являются невозможность финансовой оценки получаемых результатов и наличие вероятностных характеристик. Подробно рассмотрены модели проектов с неоднозначным исходом, а также проектов, допускающих повторное выполнение и многовариантность реализации. В качестве инструментария моделирования применяются временные стохастические сети Петри.

Ключевые слова: программа развития, проект, программное событие, показатель зрелости, финансовый показатель, имитационное моделирование, сеть Петри.

Введение

В настоящее время многие компании практикуют формирование программ развития своих организационно-технических систем (организационных структур, систем управления, бизнес-процессов, корпоративных информационных систем и т. д.) на конкурсной основе. При этом разными инициативными группами (как правило, включающими внешних разработчиков и консультантов) формируются альтернативные программы, одна из которых впоследствии выбирается для реализации. В связи с этим приобретает актуальность вопрос о сравнительной оценке рассматриваемых альтернатив.

Традиционные методы инвестиционного анализа, основанные на сопоставлении затрат и результатов, выраженных в финансовых терминах [1; 2], в данном случае неприменимы, поскольку экономическая эффективность программ развития сложных организационно-технических систем имеет опосредованный характер и не может быть надежно оценена в денежном выражении.

В таких случаях можно говорить о неявных экономических выгодах, получаемых в результате реализации программ развития.

Для анализа последствий реализации программ развития с неявными экономическими выгодами применим подход, при котором их результаты выражаются через изменение значений показателей уровня зрелости объекта управления, определяемых на основе специальных шкал и пороговых уровней зрелости. Примерами могут служить методики, разработанные для процессов [3], систем управления эффективностью [4], систем бизнес-интеллекта [5] и архитектуры предприятия [6].

Еще одной особенностью программ развития сложных организационно-технических систем является то, что многие из их параметров представляют собой случайные величины, что дает возможность применения имитационного моделирования. Поскольку программа развития может быть представлена в виде последовательности событий, речь в данном случае идет о дискретно-событийном моделировании [7].

В содержательном аспекте программа развития включает ряд проектов и программных событий, связанных отношениями предшествования. В состав программы могут входить сложные проекты — с неоднозначными исходами, возможностью повторного выполнения, а также проекты, способы реализации которых допускают определенную вариативность. Реализация программы развития приводит к изменению показателей зрелости объекта управления, а также к определенным затратам, которые описываются при помощи финансовых показателей. Продолжительность проектов и другие временные лаги в общем случае являются случайными величинами.

Содержательная постановка задачи представляет собой основу для формирования конкретных моделей с применением определенного инструментария. В данной работе в качестве инструментария рассматриваются временные стохастические сети Петри, которые, несмотря на определенные ограничения, являются довольно эффективным средством моделирования поведения сложных систем. В свою очередь, такие модели могут служить основой для решения реальных практических задач с помощью более функциональных информационных систем имитационного моделирования, таких как Actor Pilgrim [8], AnyLogic [9] или Arena [10].

Результаты моделирования играют важную роль при выборе одной из альтернативных программ развития. Однако это не исключает возможности рассмотрения дополнительных факторов и последующего многокритериального выбора с применением экспертных оценок.

Временные стохастические сети Петри

Классическая сеть Петри [11] представляет собой кортеж, включающий множества позиций, переходов, а также связывающих их дуг. По сути, данная структура является

ориентированным графом, который содержит два типа узлов — позиции и переходы. Дуги графа соединяют либо позиции с переходами (входящие дуги), либо переходы с позициями (исходящие дуги). По отношению к некоторому переходу позиции также подразделяются на входящие (соединенные с данным переходом входящими дугами) и исходящие (соединенные с переходом исходящими дугами).

В позициях сети находятся метки (называемые также фишками или маркерами). Их совокупное расположение определяет состояние системы и называется маркировкой сети. Изменение маркировки происходит в результате срабатывания переходов.

Переход считается доступным, если число меток в каждой из его входящих позиций не меньше, чем число дуг, соединяющих позицию с переходом. Доступность перехода — необходимое условие его срабатывания. При срабатывании перехода происходит удаление меток из всех его входящих позиций (для каждой позиции число удаляемых меток равно количеству входящих дуг, связывающих позицию с данным переходом) и создание меток в исходящих позициях (для каждой позиции число новых меток равно количеству исходящих дуг, связывающих переход с этой позицией).

Дугам могут присваиваться весовые коэффициенты (веса), отражающие их кратность (дуга с весом w соответствует w сонаправленным дугам единичной кратности).

Двумя вариациями, появившимися в результате развития первоначальной модели, являются временные и стохастические сети Петри.

Временная сеть Петри позволяет задавать задержки (временные лаги), связанные с изменением положения меток в позициях. К числу способов описания таких задержек относятся продолжительность срабатывания, продолжительность доступности и продолжительность удерживания [12]. В частности, продолжительность удерживания предусматривает наличие двух типов меток — реальных (определяющих доступность последую-

щих переходов) и условных (резервируемых для переходов, но не влияющих на их доступность). В этом случае срабатывание перехода приводит к удалению из входящих позиций реальных меток и одновременно — к созданию в исходящих позициях условных меток, которые по истечении заданного промежутка времени превращаются в реальные.

В стохастических сетях Петри [13] задержки любого типа могут представлять собой не только детерминированные, но и случайные величины. Также может применяться вероятностная маршрутизация, предусматривающая вероятностный выбор одного из нескольких доступных переходов [14].

Применимость временных стохастических сетей Петри для моделирования программ развития объясняется тем, что они обеспечивают описание как различных временных задержек, так и вероятностных характеристик объекта моделирования. Также предполагается применение некоторых дополнительных атрибутов, необходимых для описания влияния проектов и программных событий на показатели зрелости и финансовые показатели.

Моделирование элементов программы развития и связей между ними

Идея применения сетей Петри для моделирования проектов не является новой. Однако работы в этой области (например, [15; 16; 17]) сфокусированы не на долгосрочных программах развития, а на вопросах оперативного управления проектами, включая построение графиков выполнения работ, распределение выделенных ресурсов и выравнивание профилей загрузки рабочих центров. Основы моделирования программ развития рассмотрены в авторской работе [18], но без учета таких особенностей, как неоднозначность исходов проектов, возможность их повторного выполнения и вариативность реализации.

Предлагаемый подход к моделированию программ развития учитывает все элементы содержательной постановки задачи. Комплексный пример, включающий основные элементы модели, представлен на рис. 1. Здесь и далее, если не указано иначе, дуги имеют единичную кратность и нулевую

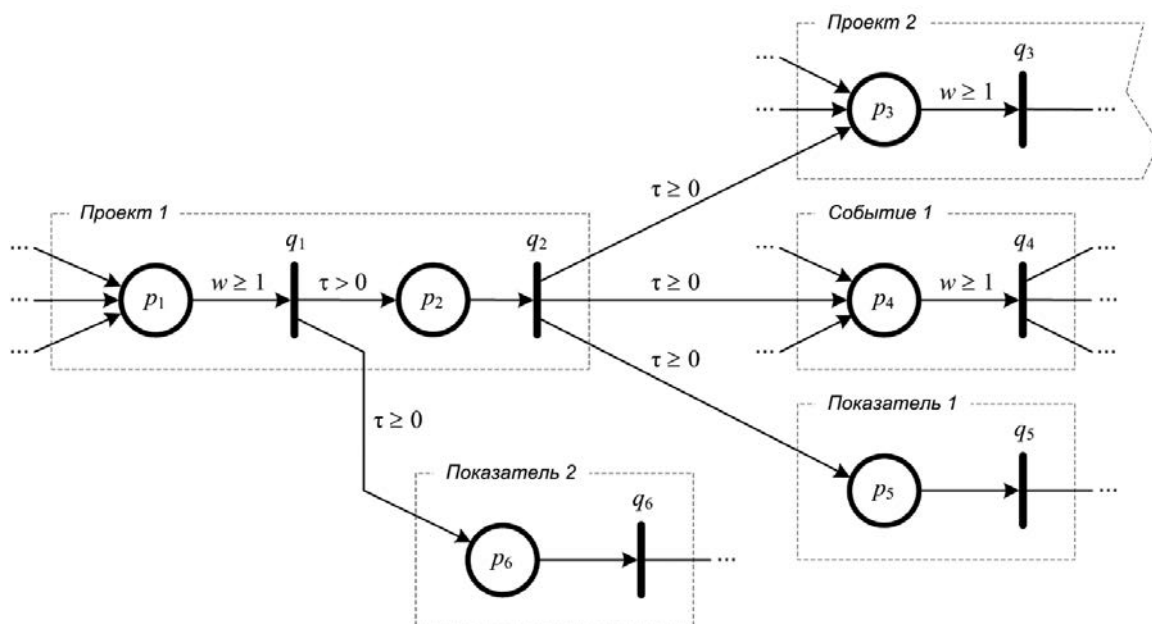


Рис. 1. Элементы модели и связи между ними

Fig. 1. Elements of the model and relationships between them

задержку. Также отметим, что все параметры модели (кроме кратности дуг w) могут быть как детерминированными, так и случайными.

Для моделирования отдельного проекта (Проект 1) предусматриваются две позиции (p_1 и p_2) и два перехода (q_1 и q_2). Позиция p_1 и переход q_1 характеризуют начало проекта, а позиция p_2 и переход q_2 — его завершение (будем называть их соответственно позициями и переходами начала и завершения проекта). К числу дуг относятся дуга начала проекта (p_1, q_1), дуга выполнения проекта (q_1, p_2) и дуга завершения проекта (p_2, q_2). Атрибутом дуги начала проекта является кратность w , равная числу предшествующих проектов (если проект не имеет предшествующих, то кратность равна единице). Атрибутом дуги выполнения проекта является продолжительность выполнения проекта τ .

Каждый из предшествующих проектов при завершении создает по одной метке в позиции p_1 . При накоплении в позиции p_1 реальных меток в количестве, равном числу предшествующих проектов, переход q_1 становится доступным и срабатывает (начало реализации проекта). При срабатывании все метки из позиции p_1 удаляются, а в позиции p_2 создается одна новая условная метка, которая по истечении периода задержки τ превращается в реальную. В момент появления реальной метки переход q_2 становится доступным и тут же срабатывает (завершение проекта).

Последовательность проектов описывается при помощи дуг предшествования (в данном примере это дуга (q_2, p_3) с задержкой τ , которая характеризует временной лаг между завершением предшествующего проекта и возможным началом последующего.

Для моделирования программного события (Событие 1) предусматривается одна позиция p_4 и один переход q_4 , называемые соответственно позицией и переходом события. Эти узлы связаны дугой события (p_4, q_4), имеющей нулевую задержку и кратность w , равную числу предшествующих проектов. Предшествующие проекты связаны с со-

бытием дугами по аналогии с дугами, описывающими последовательность проектов. Событие считается наступившим при появлении в позиции p_4 реальных меток в количестве, равном числу предшествующих проектов, и срабатывании перехода события q_4 .

Для моделирования показателя любого типа предусматривается одна позиция и один переход, называемые соответственно позицией и переходом показателя. В рассматриваемом примере Показателю 1 соответствуют позиция p_5 и переход q_5 , связанные дугой (p_5, q_5). Атрибутами позиций показателей являются их значения, которые для показателей зрелости выражаются в терминах выбранной шкалы, а для финансовых показателей — в денежных единицах.

Влияние проектов и событий на показатели описывается дугами воздействий. Например, Показатель 1 находится под влиянием Проекта 1, поэтому переход завершения проекта q_2 связан с позицией показателя p_5 дугой воздействия (q_2, p_5). Поскольку финансовые показатели могут изменяться не только в результате завершения проектов, но и вследствие их начала (например, в случае авансовых платежей), позиции таких показателей могут соединяться дугами воздействий с переходами начала соответствующих проектов. Например, изменение Показателя 2 происходит в результате начала Проекта 1, поэтому дуга воздействия (q_1, p_6) связывает переход начала проекта q_1 с позицией показателя p_6 .

Помимо временных задержек, дуги воздействия имеют дополнительные атрибуты, характеризующие степень воздействия проектов и событий на соответствующие показатели. В частности, для дуг, описывающих воздействие на показатели зрелости, задаются величины гарантированного эффекта. Каждая из них представляет собой значение, которое данное воздействие гарантирует соответствующему показателю зрелости. При воздействии на показатель зрелости он приобретает новое значение, равное максимуму

из двух величин — его текущего значения и величины гарантированного эффекта данного воздействия. Что касается дуг, описывающих воздействие на финансовые показатели, то для них задаются размеры платежей.

Сложные проекты

Как было отмечено, важная особенность программ развития организационно-технических систем — наличие сложных проектов, к числу которых относятся проекты с неоднозначным исходом, проекты с возможностью повторного выполнения и проекты с несколькими возможными вариантами реализации. Модели таких проектов представляют собой развитие рассмотренной выше модели простого проекта.

Для моделирования проекта с неоднозначным исходом (рис. 2), как и для простого проекта, предусматриваются позиции начала проекта p_1 и завершения проекта p_2 , переход начала проекта q_1 , а также дуги начала проекта (p_1, q_1) и выполнения проекта (q_1, p_2). Как и раньше, дуга начала проекта имеет нулевую задержку и кратность, равную числу предшествующих проектов, а дуга выполнения проекта — единичную кратность и положительную задержку (продолжительность выполнения проекта), которая может быть детерминированной или случайной.

Отличие от простой модели состоит в том, что проект с неоднозначным исходом имеет не один, а несколько переходов завершения и соответственно несколько дуг, связывающих позицию завершения проекта с этими переходами. Каждый из переходов завершения проекта отражает один из возможных результатов, которые могут быть получены при его реализации. Такие переходы являются альтернативными: они становятся доступными одновременно, но сработать может лишь один из них. Срабатывающий переход выбирается на основе вероятностной маршрутизации, поэтому для дуг завершения проекта задаются вероятности π , сумма которых равна единице.

Как и раньше, каждая из дуг завершения проекта имеет единичную кратность и нулевую задержку, поэтому вероятность выбора перехода является единственным дополнительным параметром, присваиваемым таким дугам.

В рассматриваемом примере проекту соответствуют два перехода завершения проекта (q_2 и q_3) и две дуги завершения проекта — (p_2, q_2) и (p_2, q_3). При появлении реальной метки в позиции p_2 оба перехода завершения проекта оказываются доступными. В этот момент производится вероятностный выбор одного из них. Срабатывание выбранного перехода означает завершение проекта с тем или иным результатом.

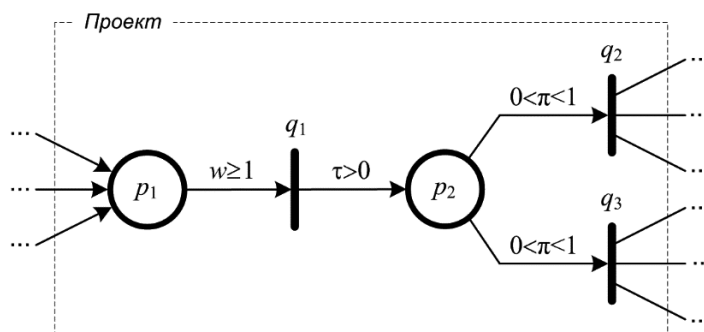


Рис. 2. Проект с неоднозначным исходом

Fig. 2. A project with uncertain outcome

Проект с возможностью повторного выполнения может рассматриваться как частный случай проекта с неоднозначным исходом, при котором один из возможных результатов реализации проекта означает необходимость его возобновления (рис. 3).

В рассматриваемом примере исход, означающий повторное выполнение проекта, описывается переходом q_3 . При срабатывании этого перехода благодаря возвратной дуге (q_3, p_1) происходит создание меток в позиции начала проекта p_1 с последующим повторным срабатыванием перехода начала проекта q_1 . Поскольку кратность дуги начала проекта (p_1, q_1) равна количеству предшествующих проектов, для доступности перехода q_1 необходимо появление в позиции p_1 соответствующего числа меток. Поэтому возвратная дуга (q_3, p_1) имеет ту же кратность, что и дуга начала проекта (p_1, q_1). Если повторное выполнение проекта возможно лишь спустя некоторое время после завершения предыдущей итерации, то возвратной дуге (q_3, p_1) присваивается задержка τ .

В некоторых случаях параметры проекта с возможностью повторного выполнения зависят от номера итерации. Например, устранение отдельных недостатков может занимать существенно меньше времени, чем первичное выполнение проекта, а вероятность нового повтора на каждой следующей итерации может снижаться. К числу параметров, зависящих от номера итерации, относятся про-

должительность проекта, параметры вероятностной маршрутизации (включая вероятность повтора), а также временной лаг между окончанием проекта и его возобновлением. В таких случаях дугам вместо единственного значения соответствующего атрибута присваивается вектор, в котором каждый i -й элемент представляет собой значение соответствующего параметра на i -й итерации реализации проекта. Также вводится счетчик итераций как дополнительный атрибут перехода начала проекта (в начале моделирования его значение равно нулю, а при каждом срабатывании перехода увеличивается на единицу).

Проект с несколькими вариантами реализации, по сути, представляет собой набор из нескольких альтернативных проектов, которым предшествуют одни и те же работы (рис. 4).

Модель такого проекта имеет единственную начальную позицию p_1 , являющуюся общей для всех альтернативных вариантов реализации. Что же касается переходов начала проекта, а также позиций и переходов завершения проекта, то количество элементов каждого из этих типов равно числу возможных вариантов реализации проекта (в данном примере — двум). Позиция начала проекта p_1 связана с каждым из переходов начала проекта (q_1 и q_2) входящими дугами, имеющими кратность, равную числу предшествующих проектов. Все переходы начала проекта становятся доступными одновременно, но, поскольку варианты

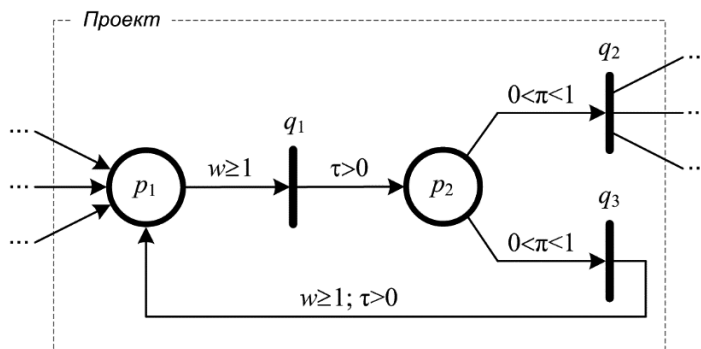


Рис. 3. Проект с возможностью повторного выполнения

Fig. 3. A project with possibility of re-implementation

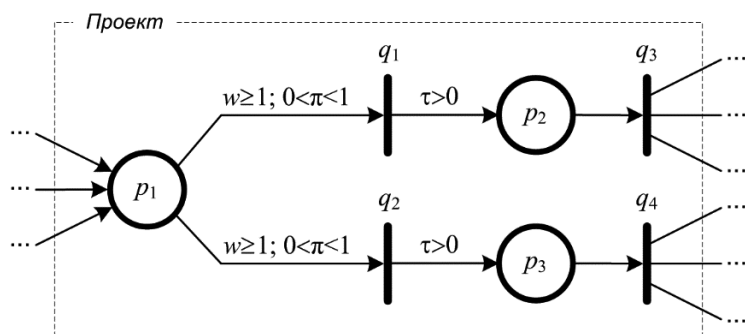


Рис. 4. Проект с несколькими вариантами реализации

Fig. 4. A project with few variants of implementation

реализации являются альтернативными, сработать может лишь один из них. Для вероятностной маршрутизации дугам, связывающим начальную позицию p_1 с альтернативными переходами начала проекта q_1 и q_2 , присваиваются вероятности π , сумма которых равна единице.

При появлении в начальной позиции p_1 реальных меток в количестве, равном числу предшествующих проектов, оба альтернативных перехода q_1 и q_2 становятся доступными, после чего один из них, определяемый вероятностным выбором, срабатывает. Дальнейшее поведение модели полностью идентично простому проекту. Продолжительности различных вариантов реализации проекта задаются параметрами задержки τ , которые, как и раньше, присваиваются дугам, соединяющим переходы начала проекта и соответствующие позиции его завершения.

Сложные случаи разных типов могут сочетаться друг с другом. Примером может служить проект с несколькими вариантами реализации, каждый из которых имеет по несколько возможных исходов, один из которых предусматривает повторное выполнение проекта.

Начало и завершение моделирования

Для полноты описания имитационной модели необходимо рассмотреть ее элементы, задействованные соответственно при начале и завершении процесса моделирования.

К числу начальных элементов модели относятся стартовая позиция, стартовый переход и связывающая их дуга, имеющая единичную кратность и нулевую задержку. Стартовый переход связан дугами предшествования с начальными позициями всех проектов, которым не предшествуют никакие другие. Как и все дуги предшествования, эти дуги имеют неотрицательные временные задержки, которые в данном случае характеризуют временные лаги между началом процесса моделирования и началом того или иного проекта.

Начальная маркировка сети такова, что в стартовой позиции модели находится единственная метка, в то время как все остальные позиции меток не содержат. Наличие метки в стартовой позиции обеспечивает доступность и срабатывание стартового перехода. При этом в позициях начала проектов, инцидентных стартовому переходу, создаются условные метки, которые по истечении заданных периодов задержки становятся реальными. Появление реальных меток в позициях начала проектов означает начало их выполнения.

К числу конечных элементов модели относятся конечная позиция и конечные дуги (с единичной кратностью и нулевой задержкой), которые соединяют переходы показателей с конечной позицией модели.

При появлении меток в позициях показателей и срабатывании соответствующих пе-

реходов в конечной позиции модели создаются новые метки. Эти метки не подлежат удалению и остаются в конечной позиции сколь угодно долго. Процесс моделирования заканчивается при достижении конечной маркировки сети, при которой все позиции, за исключением конечной, оказываются свободными от меток.

Заключение

Результаты имитационной модели могут служить основой для принятия решения о выборе одной из альтернативных программ развития. Двумя критериями, применяемыми при оценке программ, являются их результативность и ресурсоемкость.

Оценка результативности программы развития осуществляется на основе динамики уровня зрелости объекта управления относительно определенных пороговых значений. При этом на основе частных показателей зрелости необходимо построить интегральный показатель, характеризующий уровень развития системы в целом. Тогда результативность программы может выражаться либо через достигаемое значение интегрального показателя, либо через повышение уровня зрелости объекта управления по сравнению с текущим состоянием. Если задан целевой уровень развития, то результативность также может выражаться через время, необходимое для достижения этого уровня.

Что касается ресурсоемкости программы развития, то она может оцениваться традиционными финансовыми показателями, такими как суммарные затраты или сумма дисконтированных платежей. Эти показатели также являются интегральными, поскольку рассчитываются на основе отдельных денежных потоков, возникающих при реализации программ.

Поскольку постановка задачи предусматривает наличие вероятностных параметров, все характеристики программ развития также представляют собой случайные

величины. Поэтому для оценки показателей результативности и ресурсоемкости необходимо применение статистических метрик, например средних значений или процентилей.

Для дальнейших исследований можно выделить три направления.

Первое направление связано с развитием самой модели. К нему, в частности, относится разработка методик оценки параметров модели, включая временные задержки и степень влияния программы развития на показатели. Также представляется возможным применение нечеткой логики для оценки уровня зрелости объекта управления: в этом случае показатели зрелости будут принимать нечеткие значения, а влияние проектов и событий на эти показатели будет описываться нечеткими случайными величинами.

Второе направление связано с реализацией модели в профессиональных средах имитационного моделирования с учетом функциональных возможностей, обеспечиваемых теми или иными программными продуктами.

Третье направление связано с разработкой рекомендаций в области организации процессов принятия решений. Это связано с уточнением сущности и методик расчета показателей оценки программ развития, а также с практикой их интерпретации. Если представляется целесообразным рассмотрение дополнительных трудно формализуемых критериев, то возникает необходимость постановки задачи многокритериального выбора на основе индивидуальных или групповых экспертных оценок с применением соответствующего математического аппарата и информационных систем [19; 20]. Однако даже при экспертном подходе результаты моделирования продолжают играть важную роль — либо в качестве «объективных» (не оцениваемых экспертами) характеристик программ развития, либо в качестве основы для экспертных оценок по критериям результативности и ресурсоемкости.

Список литературы

1. Ковалев В. В. Финансовый менеджмент: теория и практика. М.: Проспект, 2015. — 1104 с.
2. Bierman H. (Jr.), Smidt S. The capital budgeting decision: Economic analysis of investment projects. N. Y.: Routledge, 2007. — 402 p.
3. Capability maturity model for software: Version 1.1. Technical report. CMU/SEI-93-TR-024; ESC-TR-93-177. February 1993. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1993. — 64 p.
4. Aho M. What is your PMI? A model for assessing the maturity of performance management in organizations // Proc. Performance Management: From Strategy to Delivery (PMA 2012) Conf. Cambridge, UK, 2012. P. 1–22.
5. Eckerson W. W. Beyond the basics: Accelerating BI maturity. Renton, WA: TDWI, 2007. — 15 p.
6. Ross J., Weill P., Robertson D. Enterprise architecture as strategy: Creating a foundation for business execution. Boston: Harvard School Press, 2006. — 234 p.
7. Wainer G. A. Discrete-event modeling and simulation: A practitioner's approach. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. — 520 p.
8. Емельянов А. А., Емельянова Н. З. Имитационное моделирование и компьютерный анализ экономических процессов. Смоленск: Универсум, 2013. — 266 с.
9. Бунцев И. А. Создание и реализация имитационных моделей в программной среде AnyLogic. М.: Горячая линия — Телеком, 2015. — 153 с.
10. Kelton W. D., Sadowski R. P., Swets N. B. Simulation with Arena. L.: McGraw-Hill, 2014. — 656 p.
11. Petri C. A. Kommunikation mit automaten. Bonn: Universitat Bonn, Institut fur Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2, 1962. — 128 p.
12. Bowden F. D. J. A brief survey and synthesis of the roles of time in Petri nets // Mathematical and Computer Modelling. 2000. No. 31. P. 55–68.
13. Haas P. J. Stochastic Petri nets: Modelling, stability, simulation. N. Y.: Springer, 2002. — 529 p.
14. Clempner J. A hierarchical decomposition of decision process Petri nets for modeling complex systems // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2010. Vol. 20. No. 2. P. 349–366.
15. Capek R., Sucha P., Hanzalek Z. Production scheduling with alternative process plans // European Journal of Operational Research. 2012. No. 217. P. 300–311.
16. Kao H.-P., Wang B., Dong J., Ku K.-C. An event-driven approach with makespan/cost tradeoff analysis for project portfolio scheduling // Computers in Industry. 2006. No. 57. P. 379–397.
17. Mejia G., Nino K., Montoya C., Sanchez M. A., Palacios J., Amodeo L. A Petri Net-based framework for realistic project management and scheduling: An application in animation and videogames // Computers & Operations Research. 2016. No. 66. P. 190–198.
18. Исаев Д. В. Анализ инвестиций в развитие систем управления эффективностью с применением сетей Петри // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2015. № 20 (254). С. 2–12.
19. Кравченко Т. К. Экспертная система поддержки принятия решений // Открытое образование. 2010. № 6. С. 147–156.
20. Кравченко Т. К. Системы поддержки принятия решений при оценке эффективности инвестиционных проектов в телекоммуникационной сфере // Прикладная информатика. 2014. № 5 (53). С. 119–134.

References

1. Kovalev V. V. *Finansovyi menedzhment: teoriya i praktika* [Financial management: theory and practice]. Moscow, Prospekt Publ., 2015. 1104 p.
2. Bierman H. (Jr.), Smidt S. *The capital budgeting decision: Economic analysis of investment projects*. New York, Routledge, 2007. 402 p.
3. *Capability maturity model for software: Version 1.1*. Technical report. CMU/SEI-93-TR-024; ESC-TR-93-177. February 1993. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1993. 64 p.
4. Aho M. *What is your PMI? A model for assessing the maturity of performance management in organizations*. Proc. of Performance Management: From Strategy to Delivery (PMA 2012) Conf. Cambridge, UK, 2012, pp. 1–22.
5. Eckerson W. W. *Beyond the basics: Accelerating BI maturity*. Renton, WA, TDWI, 2007. 15 p.
6. Ross J., Weill P., Robertson D. *Enterprise architecture as strategy: Creating a foundation for business execution*. Boston, Harvard School Press, 2006. 234 p.
7. Wainer G. A. *Discrete-event modeling and simulation: A practitioner's approach*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2009. 520 p.
8. Emelyanov A. A., Emelyanova N. Z. *Imitatsionnoe modelirovanie i komp'yuternyi analiz ekonomicheskikh protsessov* [Simulation modeling and computer analysis of economic processes]. Smolensk, Universum Publ., 2013. 266 p.
9. Buntsev I. A. *Sozdanie i realizatsiya imitatsionnykh modelei v programmnoi srede AnyLogic* [Development and implementation of simulation models in AnyLogic program environment]. Moscow, Goryachaya Liniya — Telekom Publ., 2015. 153 p.
10. Kelton W. D., Sadowski R. P., Swets N. B. *Simulation with Arena*. London, McGraw-Hill, 2014. 656 p.

11. Petri C. A. *Kommunikation mit automaten*. Bonn, Universität Bonn, Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2, 1962. 128 p.
12. Bowden F. D. J. *A brief survey and synthesis of the roles of time in Petri nets*. *Mathematical and Computer Modelling*, 2000, no. 31, pp. 55–68.
13. Haas P. J. *Stochastic Petri nets: Modelling, stability, simulation*. New York, Springer, 2002. 529 p.
14. Clempner J. *A hierarchical decomposition of decision process Petri nets for modeling complex systems*. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2010, vol. 20, no. 2, pp. 349–366.
15. Capek R., Sucha P., Hanzalek Z. *Production scheduling with alternative process plans*. *European Journal of Operational Research*, 2012, no. 217, pp. 300–311.
16. Kao H.-P., Wang B., Dong J., Ku K.-C. *An event-driven approach with makespan/cost tradeoff analysis for project portfolio scheduling*. *Computers in Industry*, 2006, no. 57, p. 379–397.
17. Mejia G., Nino K., Montoya C., Sanchez M. A., Palacios J., Amodeo L. *A Petri Net-based framework for realistic project management and scheduling: An application in animation and videogames*. *Computers & Operations Research*, 2016, no. 66, pp. 190–198.
18. Isaev D. V. *Analiz investitsii v razvitie sistem upravleniya effektivnost'yu s primeneniem setei Petri* [Analysis of investments in performance management systems development using Petri nets]. *Financial Analytics: Science and Experience*, 2015, no. 20 (254), pp. 2–12.
19. Kravchenko T. K. *Ekspertnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenii* [Expert decision support system]. *Open Education*, 2010, no. 6, pp. 147–156.
20. Kravchenko T. K. *Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii pri otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov v telekommunikatsionnoi sfere* [Decision support systems for evaluating investment projects efficiency in telecom sphere]. *Prikladnaya Informatika — Journal of Applied Informatics*, 2014, no. 5 (53), pp. 119–134.

D. Isaev, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, disaev@hse.ru

Modeling of development programs with stochastic parameters and uncertain economic benefits

The paper focuses on analyzing development programs for complex organizational and technical systems. Such programs comprise projects and program events linked with each other by relations of precedence. The programs exert influence on maturity of managed objects and have certain financial consequences. Distinctive features of such programs include impossibility of assessment of their results in financial terms, as well as availability of stochastic characteristics. Stochastic nature of key parameters of development programs (projects durations, time lags between projects and events, power of impact on maturity and financial metrics) makes it possible to apply discrete-event modeling. Special attention is paid on complicated projects of three types: with uncertain outcome, with possibility of re-implementation and with few variants of implementation. As a modeling tool, timed stochastic Petri nets with certain attributes of places, transitions and arcs are applied. Different time lags are described by the means of holding durations assigned to the arcs. For complicated projects, special routing policies allowing stochastic selection of firing transitions are used. The modeling approach allows analyzing consequences of potential development programs, including both their effects and related expenditures. In turn, the modeling results help to justify decisions regarding comparison of alternative development programs and selection of one of them for implementation.

Keywords: development program, project, program event, maturity metric, financial metric, simulation modeling, Petri net.

About author: D. Isaev, PhD in Economics, Associate Professor

For citation: Isaev D. Modeling of development programs with stochastic parameters and uncertain economic benefits. *Prikladnaya Informatika — Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 1 (67), pp. 16–25 (in Russian).