

## Анализ программ инновационного развития организаций с помощью имитационной модели динамического программирования

*Analysis of innovation development programs of organizations with simulation model of dynamic programming*

**Новыш Борис Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой экономико-математических методов управления Академии управления при Президенте Республики Беларусь

**Novysh Boris**, PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor, head of the Department of information technologies and higher mathematics of Academy of public administration under the aegis of the President of the Republic of Belarus

**e-mail:** novysh@pac.by

**Гваева Ирена Викторовна**, магистр управления и экономики, аспирант Академии управления при Президенте Республики Беларусь

**Gvayeva Irena**, Master of Economics and Management, PhD student of Academy of public administration under the aegis of the President of the Republic of Belarus

**e-mail:** irena@pac.by

### Аннотация

В условиях высокого уровня риска, характерного для реализации проектов и программ инновационного развития организаций и предприятий, применение в процессе планирования классической оптимизационной модели динамического программирования не является корректным. В настоящей работе представлена многокритериальная имитационная модель динамического программирования, позволяющая учесть как влияние фактора риска, так и комплексную (многокритериальную) природу показателя эффективности управления. Модель позволяет количественно оценить риски, связанные с превышением допустимых уровней финансирования и директивных сроков выполнения отдельных этапов инновационных программ.

**Ключевые слова:** имитационная модель, динамическое программирование, локальный критерий, комплексный (интегральный) критерий, линейная свертка, показатель эффективности управления, целевая функция, оптимизация, функция распределения, вероятность.

### Abstract

Under the conditions of high level of risk, which is typical for the implementation of innovative development projects and programs of organizations and enterprises, utilization of the classical dynamic programming optimization model in the planning process is not proper. The paper presents the multi-criteria simulation model of dynamic programming, which allows taking into account the influence of risk factors and a complex (multi-criteria) nature of managerial effectiveness index. The model enables to quantify the risks associated with the excess of permissible levels of funding and scheduled times for separate stages of innovative programs.

**Keywords:** simulation model, dynamic programming, local criterion, complex (integral) criterion, linear convolution, managerial effectiveness index, objective function, optimization, distribution function, probability.

Поступила в редакцию / Received: 4.04.2016

**Web:** <http://elibrary.miu.by/journals/item.eiup/issue.46/article.9.html>

### Введение

Актуальность задачи эффективного долгосрочного планирования деятельности производственно-экономических систем масштаба организаций и предприятий представляется очевидной. В то же время, как показывает практика, используемые в процессе стратегического анализа подходы далеко не всегда соответствуют уровню сложности проблемы. Данное обстоятельство в значительной степени обусловлено отсутствием достаточно простых и в то же время надежных научно обоснованных методов и методик анализа стратегий развития в условиях многокритериальности и высокого уровня риска. В условиях недостатка информации классические

оптимизационные модели, как правило, перестают работать или дают слишком высокую погрешность предсказания, что недопустимо в реальных условиях. Эффективными альтернативами оптимизационному подходу являются регрессионные и имитационные модели, позволяющие проводить анализ при невозможности точного предсказания значений экономических, производственно-технологических, экологических и иных показателей.

### Метод динамического программирования

В практике принятия стратегических управленческих решений часто используется метод динамического программирования (ДП) [1, 2, 3]. Он позволяет про-

водить сравнительный анализ долгосрочных стратегий организаций и предприятий и формировать программы развития, в наибольшей степени соответствующие их целям. Проводится анализ управляемой системы, реализующей экономические, производственно-технологические или иные многошаговые или многоэтапные процессы. Для каждого из допустимых управлений задается показатель эффективности (целевая функция), например прибыль, затраты, рентабельность, объем производства и т.п. Целью анализа является поиск оптимального управления, переводящего систему из исходного в конечное состояние при экстремальном значении целевой функции. Классическим примером использования метода ДП является перспективное планирование работы промышленного объединения или холдинга. Проводится поиск наиболее эффективной стратегии финансирования, при которой распределение ресурсов между организациями и предприятиями позволит добиться максимального суммарного дохода за весь период планирования.

В рамках метода ДП используется принцип оптимальности Беллмана, позволяющий отказаться от оптимизации каждого шага управления независимо от других и выбирать шаговые управления с учетом будущих последствий принимаемых решений. При этом, независимо от состояния управляемой системы перед очередным шагом, управление на данном этапе должно обеспечить максимальное значение общего показателя эффективности (например, суммарной прибыли до конца процесса управления, включая прибыль на анализируемом этапе).

Следует отметить, что реализация метода на практике часто сопряжена со значительными трудностями, среди которых принципиальная невозможность детерминированной оценки параметров управляемой системы в кратко- и среднесрочной перспективе, а также необходимость учета достаточно широкого спектра финансово-экономических, производственных, технологических и иных показателей (критериев).

В настоящей статье представлена многокритериальная имитационная модель динамического программирования, позволяющая преодолеть отмеченные ограничения классической оптимизационной модели. Учет различной экономической природы отдельных критериев и их единиц измерения требует проведения нормализации (в данном случае – приведения к безразмерному виду). Интегральный (глобальный) критерий выражается в виде линейной свертки частных (локальных) показателей. Входные параметры имитационной модели генерируются с помощью обработки интервальных оценок по определенному алгоритму [4, 5].

Имитационная модель позволяет проводить анализ многоэтапных управленческих альтернатив по интегральному критерию в условиях высокого уровня риска. В программе расчетов задаются число этапов реализации стратегии (лет, месяцев или временных интервалов произвольной продолжительности), число критериев, определенные экспертами коэффициенты значимости показателей, а также границы диапазонов их локализации на каждом этапе реализации инновационной программы. К числу ограничений модели можно отнести требование аддитивности (или мультиплика-

тивности) локальных критериев. Данное ограничение, как известно, присуще и классическому оптимизационному методу ДП.

Показатель эффективности управления (целевая функция) с учетом необходимости нормировки локальных критериев принимает вид

$$F = \sum_i \sum_j r_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \frac{f_{ij}^k}{f_{\max}^k}. \quad (2)$$

Здесь суммирование подразумевает все возможные варианты управления; двоичные переменные  $x_{ij}$  определяют принадлежность этапа  $(i, j)$  к анализируемой программе инновационного развития организации;  $f_{ij}^k$  – ненормированные значения (абсолютные приращения) локального критерия  $k$  на этапе  $(i, j)$ ;  $r_{ij}$  – нормированные значения интегрального критерия на этапе  $(i, j)$  с учетом коэффициентов значимости критериев  $\alpha_k$ ;  $n$  – число учитываемых критериев;  $f_{\max}^k$  – определяемые руководством директивные (или просто желательные) значения критериев, характеризующие программу в целом.

Работу модели рассмотрим на следующем иллюстративном примере. Руководством организации анализируется ряд стратегий инновационного развития, каждая из которых включает 5 этапов (продолжительности этапов не конкретизируются – год, месяц, декада либо вообще произвольные временные диапазоны). Для определенности в процессе анализа учитывается 5 критериев (в условиях иллюстративного примера – чистая прибыль, объем выпускаемой продукции и контролируемые доли рынка трех регионов).

Экспертной группой проведена оценка интервалов, внутри которых будут находиться значения всех локальных критериев (может использоваться равномерное либо бета-распределение показателей). Руководством устанавливаются приемлемые результирующие значения локальных критериев (например, достаточными считаются получение суммарной (за весь цикл управления) чистой прибыли в  $n$  млн д.е., контролируемой доли рынка первого региона –  $m$  процентов, и т.д.). Рассчитываются коэффициенты важности критериев (в простейшем случае – путем усреднения экспертных оценок). В процессе имитационных расчетов используется бета-распределение показателей (алгоритм обработки интервальных экспертных оценок приведен в [4, 5]). Интегральный (глобальный или комплексный) критерий выражается в виде линейной свертки локальных критериев. Сетевой граф задачи приведен на рисунке 1. Переходы системы, обозначаемые стрелками, могут включать реализацию ряда проектов различной природы – структурно-организационные изменения, научно-исследовательские разработки, проекты по внедрению новой техники и технологий, маркетинговые исследования, инвестиционные проекты и т.д.

В процессе расчетов использовалось несколько тысяч имитаций. Статистический анализ имитационных экспериментов позволяет получить информацию, необходимую для обоснованного выбора перспективной

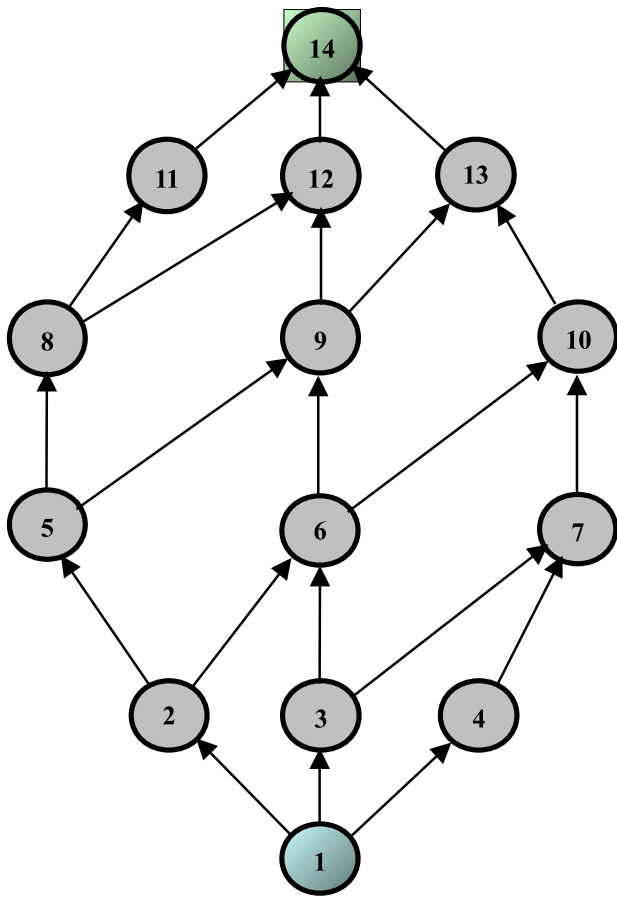


Рисунок 1 – Сетевой граф, иллюстрирующий возможные состояния и переходы системы. Очевидно, требуется анализ 12 различных многоэтапных стратегий инновационного развития

стратегии развития с учетом фактора риска и имеющихся ограничений (в первую очередь – финансовых и временных).

Полученные результаты по распределению интегрального критерия (рисунок 2), естественно, зависят от системы предпочтений руководства организации и экспертов (от значений коэффициентов значимости критериев).

Используя полученные данные, можно определить наиболее эффективную по интегральному критерию многоэтапную стратегию (рисунки 2, 3). Следует отметить, что использование значений критерия, которые могут быть получены с близкой к единице вероятностью (например, 0,99, как на рисунке 3), является более информативным (и надежным), чем использование ожидаемых значений (относительно математических ожиданий могут наблюдаться существенные по величине отклонения в ту или иную сторону).

Следует отметить, что для проектов и программ развития с высокой инновационной составляющей принципиально важной проблемой становится оценка вероятности их реализации в условиях реальных (и, как правило, достаточно жестких) временных и финансовых ограничений. С учетом этого представляется обоб-

нованным отдельный анализ данных показателей (при этом они не включаются в интегральный критерий).

Вероятности того, что программа или проект будут успешно реализованы в директивные сроки и/или при использовании заранее определенных финансовых и иных ресурсов, также могут, в принципе, оцениваться экспертным путем. Однако с учетом сложности получения таких оценок и их недостаточной надежности предлагается использовать описанный ниже алгоритм оценки. Проводится серия имитационных расчетов продолжительности и затрат на реализацию всех анализируемых инновационных программ (результаты для иллюстративного примера приведены на рисунках 4, 5).

Отбор сравнимых по интегральному критерию альтернатив должен проводиться среди программ, характеризующихся наименьшим уровнем риска невыполнения. К числу наиболее важных факторов риска принадлежит риск превышения предельно допустимых уровней финансирования и директивных сроков выполнения всех этапов. Реализующая имитационную модель программа позволяет количественно оценить данные виды риска на основе анализа результатов имитационных расчетов.

Временные и финансовые ограничения, как правило, распространяются не только на проект или программу в целом, но и на отдельные их этапы. Это может приводить к кардинальным изменениям в оценке приемлемости той или иной инновационной программы развития конкретной организации. Суммарная продолжительность и/или стоимость реализации инновационных программ могут быть удовлетворительными с точки зрения руководства, в то время как их распределение по отдельным этапам не соответствует директивным срокам или программе долгосрочного финансирования.

Таким образом, информация, отображаемая на рисунках 4 и 5, представляет интерес в случае, когда не накладываются жесткие ограничения на стоимость и продолжительность отдельных этапов программ инновационного развития.

В противном случае возникает необходимость проведения аналогичных расчетов для всех этапов программ по отдельности. Это позволяет определить вероятности успешной реализации всех этапов в директивные сроки и при заранее установленных величинах финансирования.

С учетом полученных данных имитационных расчетов достаточно просто определить перспективы реализации каждой программы. Например, вероятности реализации каждой программы  $P^{(k)}(\{z_i^{(k)}\})$  в рамках предусмотренной программы финансирования могут оцениваться по простой формуле

$$P_k^z = P^{(k)}(\{z_i^{(k)}\}) = \prod_{i=1}^{n_k} P_i^{(k)}(z_i^k), \quad (3)$$

где  $z_i^{(k)}$  – установленные руководством затраты денежных средств на реализацию этапа  $i$  программы  $k$ ,  $P_i^{(k)}(z_i^k)$  – вероятность успешной реализации этого этапа при запланированном финансировании.

Аналогично вероятность успешной реализации программы с учетом временных ограничений на каждый

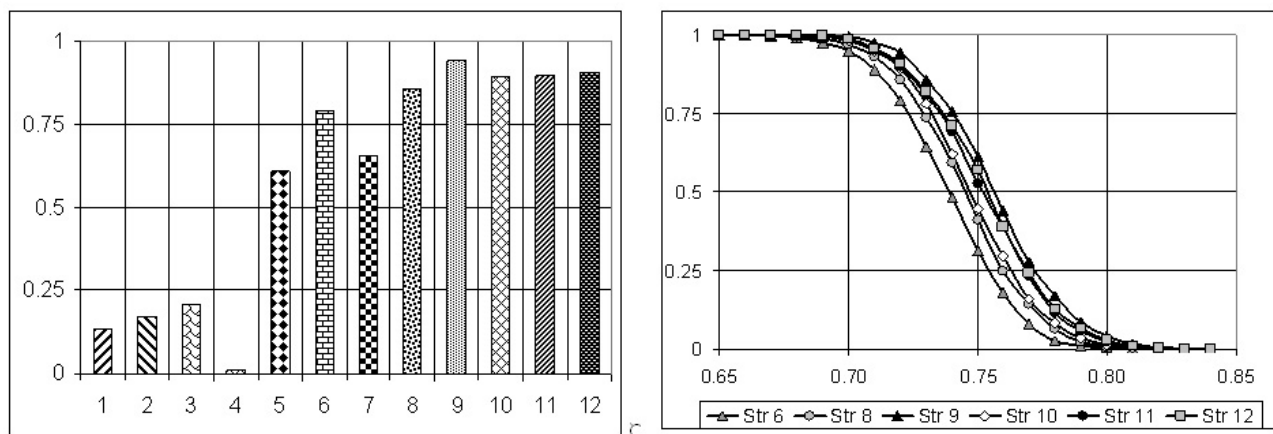


Рисунок 2 – Вероятность получения значений интегрального критерия не менее заданной величины (в данном случае – 0,72) (слева) и интегральная функция распределения  $1 - F$  для наиболее перспективных стратегий инновационного развития организации

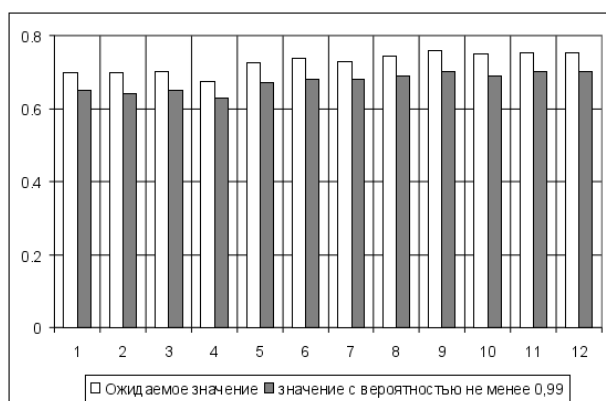


Рисунок 3 – Ожидаемые значения интегрального критерия (выделены штриховкой) и значения, вероятность получения которых достаточно высока (в данном случае – превышает 0,99). Использование в процессе анализа численных оценок второго типа представляется более предпочтительным

этап определяются по формуле

$$P_k^t = P^{(k)}(\{t_i^{(k)}\}) = \prod_{i=1}^{n_k} P_i^{(k)}(t_i^k), \quad (4)$$

где  $t_i^{(k)}$  – директивные сроки реализации этапов программы  $k$ ,  $P_i^{(k)}(t_i^k)$  – соответствующая вероятность успешной реализации этапа.

Следует ожидать, что учет ограничений для каждого этапа приведет к существенному ухудшению перспектив реализации программ. Это подтверждают расчеты, проведенные для иллюстративного примера (рисунок 6).

В частности, может оказаться, что программа, являющаяся лидером по интегральному критерию (и даже по суммарным затратам и срокам реализации) и рассматриваемая в связи с этим как наиболее перспективная, может оказаться практически нереализуемой с учетом ограничений по отдельным этапам. Таким образом, выбор оптимальной в конкретных условиях инновационной программы представляет собой достаточно

сложную (и требующую учета большого числа ограничений) задачу.

Вероятность того, что результаты программы будут достигнуты при одновременном выполнении финансовых и временных ограничений, может оцениваться как

$$P^{(k)}(z, t) = P_k^z \cdot P_k^t \quad (5)$$

при условии, что данные события могут рассматриваться как независимые.

Вероятности успешной реализации программ инновационного развития организаций с учетом ограничений стоимости и времени реализации отдельных этапов для модельного примера приведены на рисунке 77.

Следует отметить, что на рисунке 7 представлены наилучшие для суммарного финансирования (350 д.е.) и общего срока реализации программы (180 единиц времени) результаты. Они получены с помощью оптимизации целевых функций типа (3) и (4) по финансовым и временным ресурсам. При этом использовалась логистическая подгонка кривых вероятностного распределения стоимостей и продолжительностей отдельных этапов.

Анализ рисунка 7 показывает, что в условиях иллюстративного примера ни одна из программ инновационного развития не обладает достаточно высокой вероятностью успешной реализации в рамках имеющихся ограничений. Это характерно для проектов и программ с высокой инновационной составляющей. Информация такого рода может использоваться при принятии решений о дополнительном финансировании отдельных этапов инновационных программ и увеличении их продолжительностей.

В программе расчетов предусмотрена возможность учета различного уровня квалификации экспертов с учетом коэффициентов их компетентности.

## Заключение

Разработанная имитационная модель позволяет уже на стадии предварительного анализа исключить заведомо неэффективные варианты управления. Она также

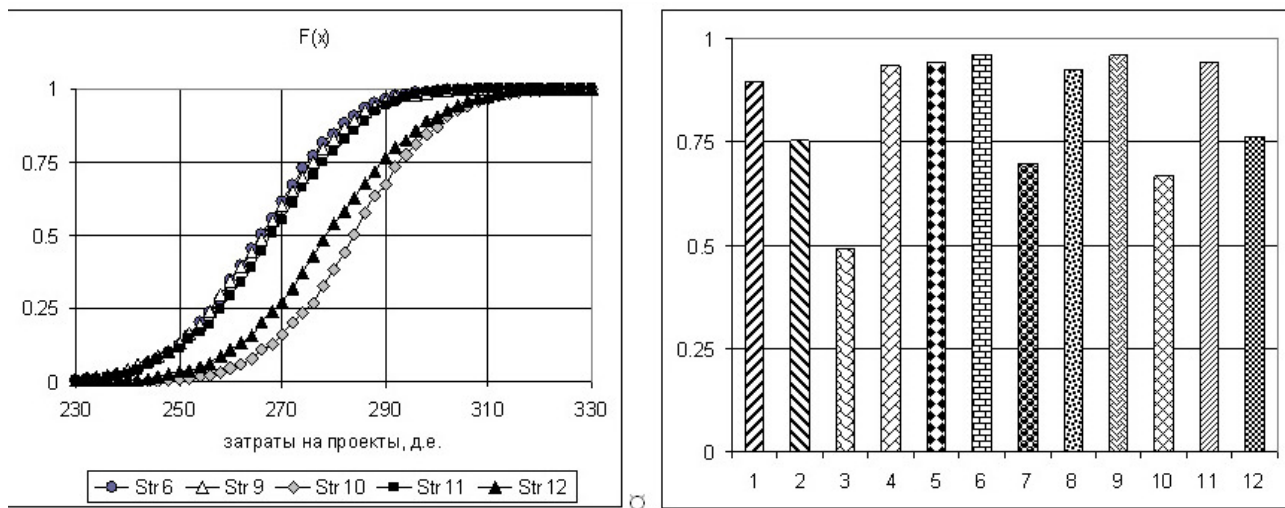


Рисунок 4 – Функция распределения затрат на некоторые рассматриваемые стратегии (проекты) (слева) и вероятности, с которыми затраты не превыдут 290 д.е.

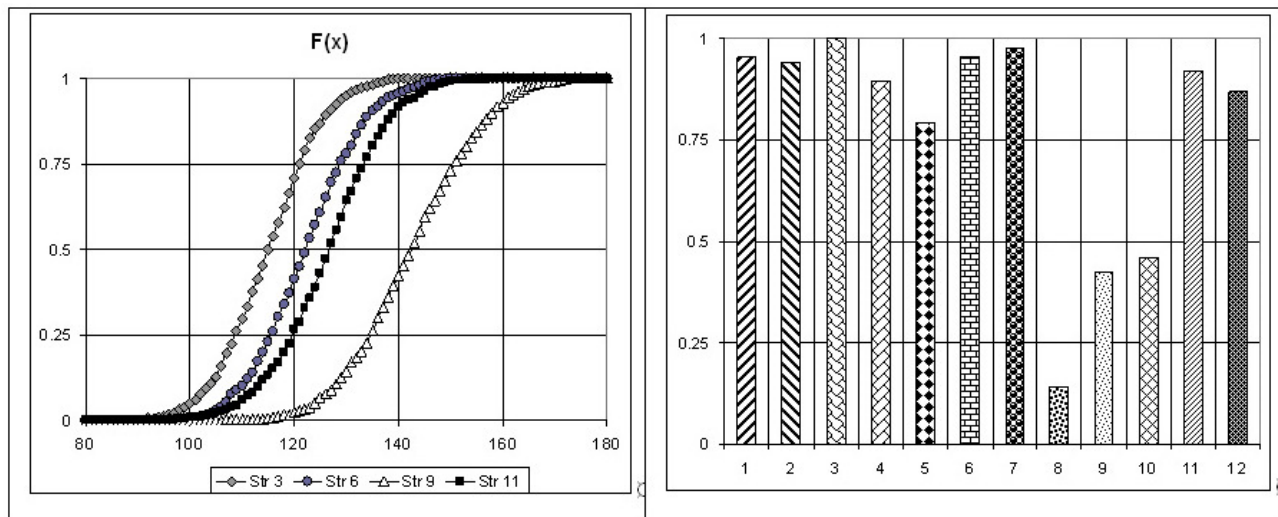


Рисунок 5 – Функция распределения времени реализации ряда стратегий (слева) и вероятности, с которыми сроки выполнения не превыдут 140 единиц времени. Лидером по продолжительности является стратегия 3

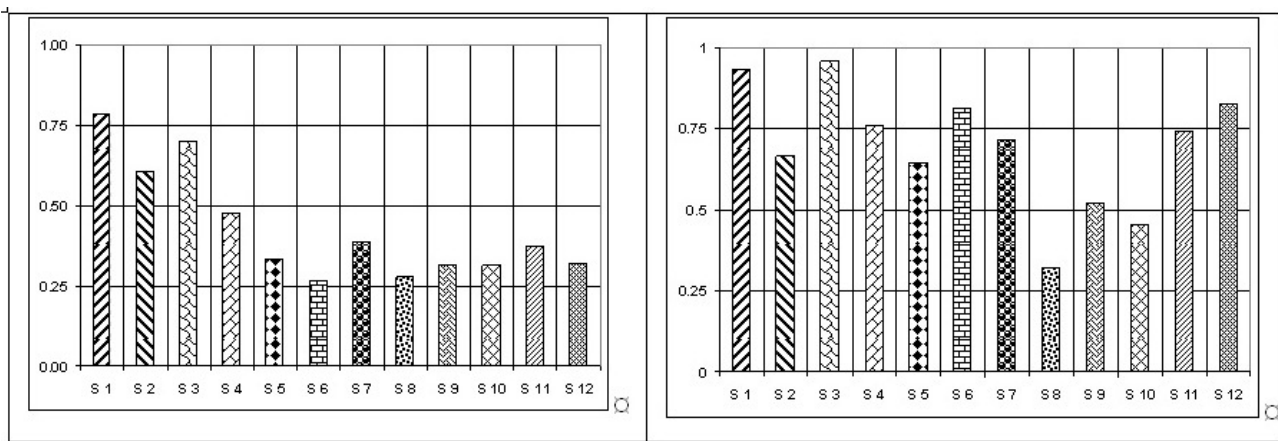


Рисунок 6 – Вероятности успешной реализации программ инновационного развития организаций с учетом ограничений стоимости (слева) и времени реализации (справа) отдельных этапов

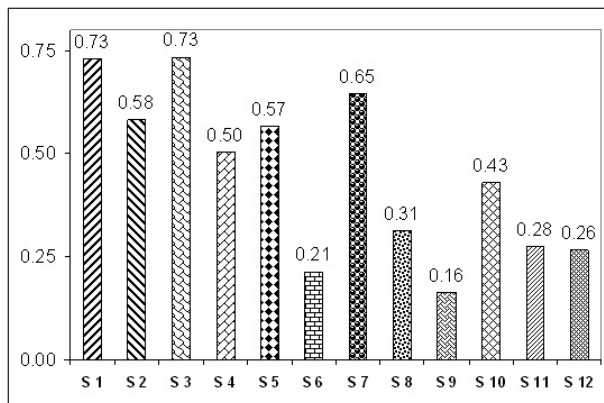


Рисунок 7 – Вероятности успешной реализации программ инновационного развития организаций с учетом ограничений как стоимости, так и времени реализации отдельных этапов для модельного примера

дает возможность непосредственно оценить вероятности успешной реализации программ инновационного развития в зависимости от распределения финансовых и временных ресурсов. Эта информация представляет значительный интерес для практических приложений. В частности, появляется возможность оценивать перспективы успешного выполнения программ при изменении программы финансирования (распределения средств по этапам) и директивных сроков, отводимых на отдельные этапы.

Адаптация программы расчетов с учетом возможности дополнительного финансирования всех или наиболее важных этапов программ потребует дополнительной экспертной информации (например, определения изменения интервальных оценок в зависимости от величин дополнительного финансирования этапов) и позволит оценить целесообразность дополнительных управляющих воздействий, приводящих к увеличению стоимости реализации программ.

Следует отметить, что надежность предсказываемых моделью результатов определяется уровнем квалификации и степенью согласованности мнений экспертов.

### Список литературы

- [1] Bertsekas, D. Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models / D. Bertsekas. – New Jersey: Prentice Hall, 1987. – 425 p.
- [2] Таха, Х.А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.  
Takha, Kh.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy / Kh.A. Takha. – М.: Vil'yams, 2007. – 912 p.
- [3] Бурков, В.Н. Модели и методы мультипроектного управления / В.Н. Бурков, О.Ф. Квон., Л.А. Цитович. – М.: ИПУ РАН, 1998. – 62 с.  
Burkov, V.N. Modeli i metody mul'tiproektnogo upravleniya / V.N. Burkov, O.F. Kvon, L.A. Tsitovich. – М.: IPU RAN, 1998. – 62 p.
- [4] Новыш, Б.В. Имитационная модель формирования портфеля региональных инвестиционных проектов

на базе интервальных экспертных оценок / Б.В. Новыш, Д.В. Шаститко // Проблемы управления. – 2014. – № 4(53) – С. 75–82.

Novysh, B.V. Imitatsionnaya model' formirovaniya portfelya regional'nykh investitsionnykh proyektov na baze interval'nykh ekspertnykh otsenok / B.V. Novysh, D.V. Shastitko // Problemy upravleniya. – 2014. – No. 4(53). – P. 75–82.

- [5] Новыш, Б.В. Многокритериальная имитационная модель управления развитием организации / Б.В. Новыш, И.В. Гваева // Экономика и управление. – 2014. – № 2(38). – С. 34–40.

Novysh, B.V. Mnogokriterial'naya imitatsionnaya model' upravleniya razvitiyem organizatsii / B.V. Novysh, I.V. Gvayeva // Ekonomika i upravleniye. – 2014. – No. 2(38). – P. 34–40.