УДК 338.24 DOI: http://doi.org/10.25728/pu.2019.3.3

РАСШИРЕННАЯ МОДЕЛЬ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА ПРИ БИНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЕГО РАБОТ

В.В. Топка

Аннотация. Рассмотрен инновационный проект, между работами которого имеется взаимодействие — технологическое, ресурсное, вероятностное, бюджетное и пр. Отмечено, что бинарное взаимное воздействие работ по вероятности в рамках проекта приводит к синергетическому эффекту: совместное выполнение двух и более работ проекта может усилить (или ослабить) их результирующий эффект. Для технологической сети инновационного проекта построена логистическая модель учета взаимовлияний (cross-impact), рассмотрена и решена задача нахождения совместных значений вероятностей технического успеха реализации работ проекта, а также задача минимизации стоимости в расширенной модели инновационного проекта.

Ключевые слова: инновационный проект, анализ взаимовлияний, логистическая модель, совместные оценки, стоимость проекта, метод линеаризации.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках работ по планированию исследований и разработок выделяется направление, рассматривающее взаимодействие проектов одной и той же программы, или работ одного и того же проекта. Это взаимодействие может быть технологическим, ресурсным, вероятностным, бюджетным и пр. В работе [1] рассмотрена модель выбора проектов, когда они в пределах программы взаимодействуют между собой в различных формах:

1) совместное использование ресурсов;
2) техническое вероятностное взаимодействие;
3) взаимодействие результатов программы.

Первая из них относится к случаю, когда проекты используют общие ресурсы — оборудование, персонал. Вторая форма осуществляется, когда успех или неудача одного раздела проекта значительно усиливает или задерживает выполнение других разделов проекта операций. При этом вероятность технического успеха некоторой операции является функцией вероятности технического успеха других операций. Наконец, в третьем случае успех обоих проектов приводит к снижению цены выпускаемых товаров. В условиях взаимодействия разделов проекта ставится задача максимизации функции текущего значения дохода (Present Value — *англ.*) при ограничениях на ассигнования. Эта задача решается методами целочисленного линейного программирования. В статье [2] рассматривается задача формирования портфеля проектов, ряд из которых взаимозависимы в том смысле, что включение обоих проектов дает дополнительный эффект (положительный или отрицательный). На включение в состав портфеля имеется n проектов-претендентов. Обозначим a_i — эффект от проекта i, a_{ij} — дополнительный эффект, если в портфель включены оба проекта i и j, c_i — затраты на проект i. Введем переменные $x_i = \{0; 1\}$. Если проект i включен в проект, то $x_i = 1$, в противном случае $x_i = 0$. Задача заключается в формировании портфеля проектов, имеющего максимальный эффект при ограниченных средствах R на реализацию проектов. В задаче имеется довольно обременительное предположение, что a_i, a_{ij}, c_i — целые числа для всех i, j; R — целое положительное число. Частный случай изложенной задачи приведен в последующей статье [3]. Другой частный случай приведен в работе [4], где взаимозависимость интерпретируется как способность бизнес-проекта развивать ряд сопутствующих бизнесов, поэтому такие проекты авторы назвали «бизнесобразующими». Верхняя оценка решения задач максимизации из работ [2—4] может быть найдена методом сетевого программирования [5].

1. АНАЛИЗ ВЗАИМОВЛИЯНИЙ

При изучении взаимосвязи социально-экономических явлений ряд авторов (см. книгу [6] и приведенную в ней библиографию) предполагают наличие вектора наблюдений рассматриваемых показателей, что позволяет им широко применять методы корреляционного и регрессионного анализа. При анализе неповторяющихся событий в практике научно-технического прогнозирования применяется подход, именуемый cross-impact (анализ взаимовлияний — *англ.*), который основан на обработке экспертных данных о степени их взаимосвязи. Пусть дана система $j,\ k \in [\overline{1, n}]$ событий, каждому из которых поставлена в соответствие переменная $p_j \in [0, 1]$. Если рассматривается система событий, наступление которых в будущем вероятно, то будем говорить о величине p_j как о вероятности (степени субъективной уверенности) в том, что j-е событие произойдет. Предполагается, что рассматриваемые события влияют друг на друга, и существует некоторая мера оценки влияния вероятности безотказного осуществления события k на вероятность безотказного осуществления события j — число c_{jk}. Эти числа заданы в виде матрицы $\mathbf{C} = (c_{jk})$. Задача состоит в том, чтобы на основании оценки текущего состояния системы при принятых гипотезах относительно ее поведения дать оценку возможного будущего состояния системы. Согласно работе [7] p есть функциональная причина p_j, если существует такая функция P, что $p_j = P(p)$. В литературе предлагаются различные виды функций P, которые имеют эвристическую ценность, однако широко применяются в практике научно-технического прогнозирования.

Предложен подход [8] к анализу взаимовлияний, который приводит к отказу от применения аппарата чистых условных вероятностей в качестве коэффициентов взаимовлияния c_{jk} и в котором используется априорное построение причинных функций. В качестве одной из них была предложена [8] функция, удовлетворяющая уравнению

$$dp_j = p_j(1 - p_j)\sum_{k \neq j}^{n} c_{jk}dp_k, \quad j,\ k \in [\overline{1, n}]. \qquad (1)$$

Вид функции в правой части уравнения (1) выбирается из тех соображений, что никакие изменения в вероятностях взаимовлияющих событий не могут изменить вероятность события, которое достоверно происходит или достоверно не происходит. Поэтому функция в правой части должна иметь корни p_j и $1 - p_j$. Эмпиризм предлагаемого подхода состоит в том, что остальная часть функции (учитывающая члены высших степеней) принимается равной константе c_{jk}, значение которой определяется путем экспертного опроса.

Решение уравнения (1), как нетрудно показать, представляет собой логистическую функцию

$$p_j = \left[1 + \exp\left(-\sum_{k \neq j}^{n} c_{jk}p_k + C_j\right)\right]^{-1}.$$

Действительно, представив уравнение (1) в виде $\dfrac{dp_j}{p_j(1 - p_j)} = \sum\limits_{k \neq j}^{n} c_{jk}dp_k$, получим

$$\ln\frac{p_j}{1 - p_j} = \sum_{k \neq j}^{n} c_{jk}p_k + C_j.$$

Граничные условия имеют вид: $p_j\big|_{(c_{jk}) = (0)} = p_j^0$, поэтому последнее соотношение приобретает вид

$$p_j = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0}\exp\left(-\sum_{k \neq j}^{n} c_{jk}p_k\right)\right]^{-1}. \qquad (2)$$

Поскольку для p_k можно выписать такое же соотношение, то, объединяя их, получим

$$p_j = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0}\exp\left(-\sum_{k \neq j}^{n} c_{jk} \times \right.\right.$$
$$\left.\left.\times\left[1 + \frac{1 - p_k^0}{p_k^0}\exp\left(-\sum_{i \neq k}^{n} c_{ki}p_i\right)\right]^{-1}\right)\right]^{-1}. \qquad (3)$$

Итак, в модели (2), (3) рассматриваются n событий, разработок, между которыми существует взаимодействие, такое что осуществление или принципиальная невозможность осуществления события k влияет на вероятность p_j осуществления события j, и эта связь описывается матрицей взаимовлияний $\mathbf{C} = (c_{jk})$. При этом обоснованность выбора логистической модели подтверждается широтой применения такого рода зависимостей в научно-техническом прогнозировании [9—12], когда показатели, характеризующие рассматриваемую систему, являются монотонно возрастающими с насыщением.

В отсутствие взаимовлияния, вероятность p_j безотказного осуществления разработки j совпадает с индивидуальной вероятностью (показателем надежности) $p_j^0(u_j)$ ее технического успеха и монотонно стремится к единице по мере роста коэффициентов взаимовлияния c_{jk}. Как было показано в работе [13], функция распределения вероятности $p_j^0(u_j)$ подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла: $p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j})$, где $\alpha_j > 0$, $\alpha_j \neq 1$ — параметр формы, $b_j > 0$ — параметр масштаба, $u > 0$ — однородный невозобновимый (складируемый) ресурс. Данная модель применяется для повышения обоснованности получаемых традиционными методами вероятностных оценок развития образцов новой техники путем учета перекрестного влияния между некоторыми разработками.

2. РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗНОГО ГРАФА И МЕТОДА РЕШАЮЩИХ МАТРИЦ НА БАЗЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ

Модель (2), (3) предназначена для описания технологических зависимостей между операциями, разработками. Конъюнктивная технологическая сеть $G(E, \Gamma)$, где E — множество вершин-работ, а $\Gamma \subset E \times E$ — множество дуг, задающих технологические отношения частичного порядка предшествования работ инновационного проекта или технологические связи прогнозного графа [14], сочетается с методом решающих матриц $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ [15], которые задают коэффициенты вклада средств j в решение задачи i.

В настоящей работе в дополнение к конъюнктивным технологическим связям основной модели предложена модель синтеза комплекса операций, дополняющая известные модели прогнозного графа В.М. Глушкова, в сочетании с методом решающих матриц Г.С. Поспелова. В этой расширенной модели нетехнологические взаимосвязи дополнительной решающей матрицы (ОКР—ОКР), задающей коэффициенты c_{ki} вклада k-й разработки в решение i-й разработки представлены бинарным взаимным воздействием разработок по методу анализа взаимовлияний.

Модель прогнозного графа В.М. Глушкова [14, *с. 152*] рассмотрим в конкретной интерпретации — как задачи прогнозирования научно-технического прогресса. Предположим, что требуется оценить вероятное время и пути решения некоторого числа нерешенных сегодня научно-технических проблем. Пусть есть описание научно-технических проблем в виде сетевого графика с наличием альтернативных путей (которые не обязательно будут пройдены при реализации графика) и используются вероятностные оценки для продолжительности переходов от одних событий к другим. Предположим далее, что каждой из указанных проблем s_i приписан некоторый весовой коэффициент λ_i, $i = 1, 2, ..., m$, определяющий относительную важность этой проблемы по сравнению с остальными. Цель состоит в решении всех указанных проблем, а в качестве критерия качества управления — минимизация суммы $\sum_i \lambda_i \tau_i$, где τ_i — срок, потребовавшийся для решения проблемы s_i при заданных суммарных ресурсах R, отпущенных на решение всех этих проблем.

Первоначальная структуризация проблемы состоит в том, чтобы дополнить список поставленных проблем (называемых далее конечными или основными целями) $s_1, s_2, ..., s_m$ новыми проблемами (промежуточными целями) $s_{m+1}, s_{m+2}, ..., s_{m+n}$, решение которых может оказаться необходимым или полезным для достижения конечных целей. Каждому из выделенных элементов s_i приписываются два булевых параметра $\alpha(t)$ и $\beta(t)$, $i = 1, 2, ..., m + n$. Первый из них характеризует состояние элемента (проблема s_i решена или не решена), а второй — управляющее воздействие (проблема s_i поставлена в план и финансируется или нет). Вводится также оценка вероятности $P_i(t)$ того, что к моменту времени t проблема s_i окажется решенной, иными словами, вероятность того, что $\alpha_i(t) = 1$, $i = 1, 2, ..., m + n$. Так же, как и про конечные цели, про промежуточные цели нельзя сказать, что они, в общем случае, являются независимыми.

В методе решающих матриц Г.С. Поспелова [15, *с. 213*] элементы *матрицы влияния* (задачи — ОКР) $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ (основные цели — промежуточные цели) являются коэффициентами γ_{ij} вклада j-й ОКР в решение i-й задачи, $i, j = \overline{1, n}$, и определяются методами обработки экспертных оценок. Кроме нее, для оценки взаимодействия промежуточных целей будем рассматривать *матрицу взаимовлияния* «ОКР — ОКР» $\mathbf{C} = (c_{jk})$. Сетевую модель прогнозного графа, вершинам которой соответствуют проблемы (основные плюс промежуточные цели) $s_1, s_2, ..., s_m, s_{m+1}, ..., s_{m+n}$, подлежащие решению с вероятностью безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$, включающую в себя решающую матрицу $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ «задачи — ОКР», дополним матрицей $\mathbf{C} = (c_{jk})$ взаимовлияния (ей соответствуют дуги (j, k) & $(k, j) \in \tilde{\Gamma}$ сети) промежуточных целей (ОКР — ОКР) — $(s_{m+1}, ..., s_{m+n})$ и, таким образом, получим расширенную модель, которую будем применять в интересах планирования инновационных проектов. Оценку параметров взаимовлияния промежуточных целей выполним по логистической модели (2) метода анализа взаимовлияний (cross-impact). В работе [14, *с. 152*] осуществление основных целей прогнозного графа обеспечивается выполнением промежуточных целей (задач), подлежащих решению с вероятностью безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$.

Для решающих матриц выберем их представление в виде ориентированного графа с весами α_{ij}, β_{ij}, γ_{jk} на дугах, а в вершинах заданы вероятности безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$, которые могут служить показателем надежности выполнения данной работы. Между i-ми средствами существует, вообще говоря, взаимное влияние, которое может иметь синергетический (или напротив) эффект. Будем его описывать при помощи матрицы $\mathbf{C} = (c_{ki})$, определяющей вероятностную функцию взаимовлияния $P(c_{ki}, u_k, u_i)$ или показатель надежности выполнения k-й разработки, которая для каждого рассматриваемого этапа проводимых исследований и разработок последовательно имеет выражение или $P_{\alpha_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$, или $P_{\beta_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$, или $P_{\gamma_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$. Тогда надежность реализации основных целей определяется слабейшим звеном

$$P_{n+1} = \min_{\mu} \prod_{(i,j) \in \mu} \alpha_{ij} P_{\alpha_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i) \times \\ \times \beta_{ij} P_{\beta_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i) \gamma_{ij} P_{\gamma_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i). \tag{4}$$

Упростив, единообразно запишем:

$$P_{n+1} = \min_{\mu} \prod_{(i,j) \in \mu} \kappa_{ij} P_{\kappa_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i), \tag{5}$$

где для проводимых исследований и разработок, κ_{ij} в формуле (5) последовательно принимает значения из множества

$$\kappa_{ij} = \begin{cases} \alpha_{ij} \text{ — фундаментальные} \to \text{прикладные}, \\ \beta_{ij} \text{ — прикладные} \to \text{ОКР}, \\ \gamma_{ij} \text{ — ОКР} \to \text{задачи}, \end{cases}$$

и в результате такой записи получается выражение (4).

Таким образом, между этапами научно-технического процесса имеются некоторые «передаточные коэффициенты», задаваемые решающими матрицами (α_{ij}), (β_{ij}), (γ_{ij}). Наглядно это можно представить так, что промежуточные цели упорядочены в работе [15, *с. 213*] по подчиненности:

задачи $\overleftarrow{\gamma_{ij}}$ ОКР $\overleftarrow{\beta_{ij}}$ прикладные исследования $\overleftarrow{\alpha_{ij}}$ фундаментальные исследования, где коэффициенты решающих матриц α_{ij}, β_{ij}, γ_{ij} — нормированные по индексу i коэффициенты важности вклада i-го средства в достижение j-й цели.

Взаимное воздействие разработок, среди прочего, включает в себя такие виды, когда повышение вероятности осуществления одной разработки приводит к повышению (понижению) вероятности осуществления другой (вероятностное взаимодействие) или когда операции совместно используют один ресурс (перемещение ресурса на другую операцию).

В качестве общей статической модели (5) зависимости показателя надежности P_{n+1} комплекса разработок от вложенного однородного складируемого ресурса $\{u_j\}$, с учетом бинарного (перекрестного) взаимного воздействия вероятности безотказного осуществления разработок, предлагается модель логистического вида:

$$P_{n+1} = \min_{\mu_l} \prod_{(i,j) \in \mu_l} \kappa_{ij} \left[1 + \frac{1 - p_i^0}{p_i^0} \exp\left(-\sum_{k \neq i} c_{ik} p_k\right)\right]^{-1},$$

где c_{ik} — коэффициенты взаимного влияния разработок, которые определяются для случая взаимодействия по вероятности следующим образом.

Чтобы избежать неточной процедуры шкалирования, возникающей при оценке коэффициентов c_{jk}, воспользуемся граничными условиями в точках $p_k = 1$ и $p_k = 0$ для соотношения (2):

$$p_j = p(j|p_k = 1) = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0} \exp(-c_{jk})\right]^{-1},$$

откуда

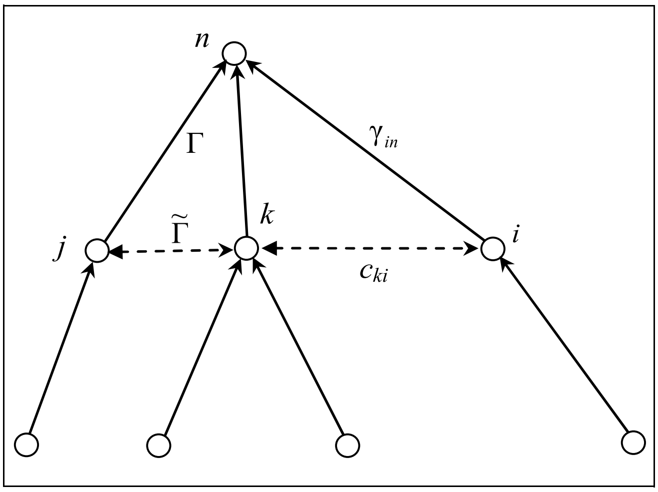
$$\exp(-c_{jk}) = \frac{1 - p_j}{p_j} \cdot \frac{p_j^0}{1 - p_j^0}.$$

Тогда

$$c_{jk} = \ln\frac{R_{jk}}{1 - R_{jk}} - \ln\frac{Q_{jk}}{1 - Q_{jk}}, \tag{6}$$

где $R_{jk} = p(j|p_k = 1)$ и $Q_{jk} = p(j|p_k = 0)$.

Таким образом, для получения коэффициентов взаимовлияния c_{jk} необходимо задать исходные данные — значения условных вероятностей



Обобщенная модель технологической сети проекта и взаимного влияния между работами (cross-impact)

$p(j|p_k = 1)$ и $p(j|p_k = 0)$, которые определяются путем опроса высококвалифицированных специалистов — экспертов и последующего представления полученной информации на основе методов обработки экспертных оценок [16].

В настоящей работе в качестве функции содействия применяется логистическая функция (2), удовлетворяющая требованиям непрерывности и ограниченности.

Таким образом, модель, обобщающая в прогнозном графе как явление воздействия между исследованиями и разработками по способу задания решающих матриц (по вертикали), так и эффект перекрестного (по горизонтали) взаимовлияния между ними по вероятности, может быть записана в виде:

$$P_{n+1} = \min_{\mu_l} \prod_{(i,j)\in\mu_l} \kappa_{ij}\left[1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0}\exp\left(-\sum_{k\ne i} c_{ik}p_k\right)\right]^{-1}, \quad (7)$$

где $k \in K = \{k | \exists i \in I : c_{ki} \ne 0\}$, p_i^0 — вероятность технического успеха разработки i в отсутствие взаимовлияния.

При $c_{ik} = 0$ модель (7) редуцируется к модели $P_{n+1} = \min_{\mu_l} \prod_{(i,j)\in\mu_l} \kappa_{ij} p_i^0(u_i)$. А в общем случае она описывает функцию распределения вероятности технического успеха, характеризующую степень достижения цели комплекса научно-исследовательских разработок, а также то позитивное/негативное воздействие, которое оказывают некоторые важные разработки на вероятность осуществления других связанных с ними разработок. Пример сети, иллюстрирующей эту модель, приведен на рисунке.

Здесь сплошными линиями отмечены связи технологического характера, штриховыми — бинарные взаимные вероятностные связи на подмножестве операций.

3. СОВМЕСТНЫЕ ОЦЕНКИ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗА ВЗАИМОВЛИЯНИЙ

Одной из основных задач анализа взаимовлияний является отыскание совместных (непротиворечивых) оценок вероятностей технического успеха p_j при известных c_{ji}; $i, j \in [\overline{1, r}]$. На координатной плоскости Π_{ij} (двумерный случай) имеем систему из двух уравнений. Координаты p_j^* решения отыскиваются из уравнений вида

$$F_j(p_j) = p_j - \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0}\exp\left(-c_{ji}\frac{1}{1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0}\exp(-c_{ij}p_j)}\right)\right]^{-1} = 0 \quad (8)$$

при помощи одномерного поиска по методу золотого сечения или методу Фибоначчи.

Для уравнения (8) p_j обозначим через x, а c_{ij} определяется по формуле (6). Результаты пяти тестовых расчетов с помощью системы MATLAB (R2009b) приведены в таблице. Видно, что при неизменных значениях p_j^0 и p_i^0: $p_j = p_i = 0{,}5$ только благодаря изменению параметров взаимозависимости разработок: условных вероятностей осуществления разработок $R_{ji} = p(j|p_i = 1)$ и $Q_{ji} = p(j|p_i = 0)$ и, соответственно, R_{ij} и Q_{ij}, на основе которых рассчитаны коэффициенты взаимовлияния c_{ji}; $i, j \in [\overline{1, r}]$ по формуле (6), принимающие значения от $c_{ji} = -4{,}3944$ до $c_{ji} = +4{,}3944$, получено изменение показателя $p_j = x1$ (вероятности осуществления разработки) от 0,25 до 0,9871. Эти расчеты наглядно показывают наличие эффекта взаимовлияния.

4. ЗАДАЧА НА МИНИМУМ СТОИМОСТИ В РАСШИРЕННОЙ МОДЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Расширенная сетевая модель (7), учитывающая эффект взаимовлияния по вероятности между некоторыми разработками, которое оказывает воздействие на функцию распределения вероятности

Результаты расчетов

Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5
$R_{ji} = 0{,}1$ $Q_{ji} = 0{,}9$ $c_{ji} = -4{,}3944$ $R_{ij} = 0{,}1$ $Q_{ij} = 0{,}9$ $c_{ij} = -4{,}3944$ $p_j = 0{,}5$ $p_i = 0{,}5$ $x1 = 0{,}2500$	$R_{ji} = 0{,}2$ $Q_{ji} = 0{,}8$ $c_{ji} = -2{,}7726$ $R_{ij} = 0{,}2$ $Q_{ij} = 0{,}8$ $c_{ij} = -2{,}7726$ $p_j = 0{,}5$ $p_i = 0{,}5$ $x1 = 0{,}3021$	$R_{ji} = 0{,}5$ $Q_{ji} = 0{,}5$ $c_{ji} = 0$ $R_{ij} = 0{,}5$ $Q_{ij} = 0{,}5$ $c_{ij} = 0$ $p_j = 0{,}5$ $p_i = 0{,}5$ $x1 = 0{,}5$	$R_{ji} = 0{,}8$ $Q_{ji} = 0{,}2$ $c_{ji} = 2{,}7726$ $R_{ij} = 0{,}8$ $Q_{ij} = 0{,}2$ $c_{ij} = 2{,}7726$ $p_j = 0{,}5$ $p_i = 0{,}5$ $x1 = 0{,}9293$	$R_{ji} = 0{,}9$ $Q_{ji} = 0{,}1$ $c_{ji} = 4{,}3944$ $R_{ij} = 0{,}9$ $Q_{ij} = 0{,}1$ $c_{ij} = 4{,}3944$ $p_j = 0{,}5$ $p_i = 0{,}5$ $x1 = 0{,}9871$

технического успеха всего планируемого комплекса, в условиях минимизации стоимости комплекса работ имеет вид задачи нелинейного программирования:

$$\sum_{j=1}^{n} c_j u_j \to \inf_{\substack{u \in U \\ \varepsilon \le p \le 1-\varepsilon}}; \quad u = (u_1, \ldots, u_n), \quad p = (p_1, \ldots, p_n),$$

$$\varepsilon \le p_j \le 1 - \varepsilon, \quad j = \overline{1, n};$$

$$P_{n+1} =$$

$$= \min_{\mu_l} \prod_{(i,j) \in \mu_l} \kappa_{ij} \left[1 + \frac{1 - p_i^0}{p_i^0} \exp\left(-\sum_{k \ne i} c_{ik} p_k\right)\right]^{-1} \ge p_0;$$

$$p_j = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0} \exp\left(-\sum_{k \ne j} c_{jk} \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \left[1 + \frac{1 - p_k^0}{p_k^0} \exp\left(-\sum_{i \ne k} c_{ki} p_i\right)\right]^{-1}\right)\right]^{-1};$$

$$p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j}); \quad \alpha_j, \beta_j > 0, \ \alpha_j \ne 1;$$

$$p_0 \in (0, 1);$$

$$l = \overline{1, m}; \quad i, j, k = \overline{1, n};$$

$$c_{jk} = \ln \frac{R_{jk}}{1 - R_{jk}} - \ln \frac{Q_{jk}}{1 - Q_{jk}}. \qquad (9)$$

Выполним замену переменных:

$$u_j = \left[\frac{-1}{b_j} \ln(1 - p_j^0)\right]^{1/\alpha_j}. \qquad (10)$$

Задача (9) принимает вид:

$$f(p^0) = \sum_{j=1}^{n} c_j \left[\frac{-1}{b_j} \ln(1 - p_j^0)\right]^{1/\alpha_j} \to \inf_{p, p^0},$$

$$g_l(p) = \ln p_0 - \sum_{j \in \mu_l} \ln p_j - \sum_{(i,j) \in \mu_l} \ln \kappa_{ij} \le 0,$$

$$p_0 \in (0, 1), \ (i, j) \in \Gamma, \ \forall l = \overline{1, m},$$

$$g_j(p, p^0) = p_j - \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0} \exp\left(-\sum_{k \ne j} c_{jk} \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \left[1 + \frac{1 - p_k^0}{p_k^0} \exp\left(-\sum_{i \ne k} c_{ki} p_i\right)\right]^{-1}\right)\right]^{-1} = 0,$$

$$p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j}); \quad \alpha_j, b_j > 0, \ \alpha_j \ne 1;$$

$$(j, k), (k, j) \in \tilde{\Gamma}; \quad j, k = \overline{1, n};$$

$$c_{jk} = \ln \frac{R_{jk}}{1 - R_{jk}} - \ln \frac{Q_{jk}}{1 - Q_{jk}}. \qquad (11)$$

Данная задача нелинейного программирования решается с помощью локального метода линеаризации в изложении Б.Т. Поляка — квадратичной аппроксимации целевой функции, линеаризации ε-активных ограничений и, при условии неотрицательности части двойственных переменных, сводится к задаче квадратичного программирования, для решения которой применяется метод сопряженных градиентов, сходящийся в этом случае не более чем за $m - n$ шагов. Поскольку данный метод — локальный, то нужно решить задачу для нескольких различных начальных точек и из полученных решений выбрать минимальное.

Эффективный при большом числе выпуклых ограничений типа нестрогих неравенств метод релаксации ограничений [17] или метод сепарабельного программирования в силу того, что в задаче (11) имеются нелинейные невыпуклые ограничения типа равенств, то эти методы становятся неприемлемы для решения данной задачи. Несмотря на то, что задача (9) сложнее рассмотренных ранее [18], она, после замены переменных, разрешима путем применения метода линеаризации в изложении Б.Т. Поляка [19, *с. 263*]. После того, как в последней задаче будут найдены оптимальные значения $p_j^0(u_j)$, из выражения (10) определяем оптимальные значения невозобновимых (складируемых) ресурсов $u^* = (u_1^*, u_2^*, ..., u_n^*)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практике выполнения инновационных проектов не исключено, что часть из работ проекта будет оказывать некоторое влияние (положительное или отрицательное) на результат выполнения других, как-то связанных с ними работ. Поэтому такое бинарное перекрестное взаимовлияние работ проектов следует, вообще говоря, учитывать. Бинарное взаимное воздействие работ по вероятности их осуществления в рамках проекта приводит к синергетическому эффекту: совместное осуществление двух и более работ проекта может усилить (или ослабить) их результирующий эффект. Для этих целей предложено применять известный из научно-технического прогнозирования подход анализа взаимовлияний (cross-impact) в виде логистической модели $p_j = P_j(c_{jk}, p_j^0, p_k)$, в которой функция распределения вероятности $p_j^0 = p_j^0(u_j, \alpha_j, b_j)$ подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла, где $u_j > 0$ — однородный невозобновимый ресурс j, $k = \overline{1, n}$. Получено соотношение, определяющее коэффициенты взаимовлияния c_{jk} как функцию значений условных вероятностей $p(j|p_k = 1)$ и $p(j|p_k = 0)$, для нахождения которых применяют экспертные оценки и методы их обработки. Предложена расширенная модель, обобщающая в прогнозном графе как явление воздействия между исследованиями и разработками по способу задания решающих матриц (снизу — вверх), так и эффект перекрестного (горизонтального) взаимовлияния между ними по вероятности. Если задана технологическая сеть инновационного проекта, то в работе построена логистическая модель учета бинарных перекрестных взаимных воздействий, рассмотрена здесь и решена задача нахождения совместных значений вероятностей технического успеха реализации работ проекта, а также сформулирована в этих условиях задача нелинейного программирования минимизации стоимости в расширенной модели инновационного проекта, для которой рекомендован эффективный метод ее решения. Данная модель применяется для повышения обоснованности получаемых традиционными методами вероятностных оценок реализации работ инновационных проектов, а, следовательно, и проектов в целом путем учета перекрестного взаимовлияния между некоторыми разработками.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aaker, D.A.*, *Tyebjee, T.T.* A model for the selection of interdependent R&D projects // IEEE Trans. on Engineering Management. — 1978. — Vol. 25, No. 2. — P. 30—36.
2. *Дранко О.И.* Формирование портфеля взаимозависимых проектов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 7, № 5. — С. 209—212. [*Dranko, O.I.* Formation of a Portfolio of Interdependent Projects // Bulletin of Voronezh State Technical University. — 2011. — Vol. 7, No. 5. — P. 209—212. (In Russian)]
3. *Дранко О.И.*, *Андрианова И.И.*, *Зенищева Г.В.* Задача формирования портфеля проектов, ряд из которых взаимозависимы // Системы управления и информационные технологии. — 2012. — Т. 50, № 4.1. — С. 138—141. [*Dranko, O.I., Andrianova, I.I., Zenisheva, G.V.* The Problem of Forming the Project Portfolio, Some of Which are Interdependent // Management Systems and Information Technology. — 2012. — Vol. 50, No. 4.1. — P. 138—141. (In Russian)]
4. *Буркова И.В.*, *Моисеева Ю.В.*, *Цветков А.В.*, *Андрианова И.И.* Задача формирования портфеля бизнесобразующих проектов // Экономика и менеджмент систем управления. — 2012. — № 4.3 (6). — С. 349—355. [*Burkova, I.V., Moiseeva, Yu. V., Tsvetkov, A.V., Andrianova, I.I.* Problem of Formation of the Portfolio Business Forming Projects // Ekonomika i Menedzhment Sistem Upravleniya. — 2012. — No. 4.3 (6). — P. 349—355. (In Russian)]
5. *Бурков В.Н.*, *Буркова И.В.*, *Попок М.В.*, *Овчинникова Т.И.* Метод сетевого программирования // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 23—29. [*Burkov, V. N., Burkova, I.V., Popok, M.V., Ovchinnikova, T.I.* Network Programming Techniques // Control Sciences. — 2005. — No. 3. — P. 23—29. (In Russian)]
6. *Бородкин Ф.М.* Статистическая оценка связей экономических показателей. — М.: Статистика, 1968. — 204 с. [*Borodkin, F.M.* Statistical Evaluation of Economic Indicators. — Moscow: Statistics, 1968. — 204 p. (In Russian)]
7. 7.*Suppes, P.* Probabilistic Theory of Causality. Acta Philosophycal Fennicay Fasc. XXIY. — Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970.
8. *Turoff, M.* An Alternative Approach to a Cross-Impact Analysis // Technological Forecasting and Social Change. — 1972. — No. 3. — P. 309—339.
9. *Бешелев С.Д.* Интенсификация научных исследований. — М.: Машиностроение, 1983. — 183 с. [*Beshelev, S.D.* Intensification of Scientific Research. — Moscow: Machinostroenie, 1983. — 183 p. (In Russian)]
10. *Рабочая* книга по прогнозированию / Отв. ред. И.В. Бестужев-Лада. — М.: Мысль, 1982. — 426 с. [Workbook on Forecasting / Ed. I.V. Bestuzhev-Lada. — Moscow: Mysl′, 1982. — 426 p. (In Russian)].
11. *Янч Э.* Прогнозирование научно-технического прогресса. — М.: Прогресс, 1974. — 592 с. [*Jantsch, E.* Technological forecasting in perspective: a framework for technological forecasting, its techniques and organization. — Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1967. — 401 p.]
12. *Bright, I.R.* A Guide to Practical Technological Forecasting. — NY: Prentice-Hall, 1972.
13. *Топка В.В.* Лексикографическое решение двухкритериальной задачи планирования проекта при ограничении на показатель его надежности // Изв. РАН. Теория и системы

управления. — 2014. — № 6. — С. 105—123. [*Topka, V.V.* Lexicographic Solution of Two-Objective Project Planning Problem Under Constrained Reliability Index // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2014. — Vol. 53, No. 6. — P. 877—895.]
14. *Глушков В.М.* Введение в АСУ. — Киев: Техника, 1974. — 319 с. [*Glushkov, V.M.* Introduction to Automated System. — Kyiv: Tekhnika, 1974. — 319 p. (In Russian)]
15. *Поспелов Г.С.*, *Ириков В.А.* Программно-целевое планирование и управление (Введение). — М.: Советское радио, 1976. — 440 с. [*Pospelov, G.S., Irikov, V.A.* Program-Target Planning and Management (Introduction). — Moscow: Soviet Radio, 1976. — 440 p. (In Russian)]
16. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация. Методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 1982. — 184 с. [*Litvak, B.G.* Expert Information. Methods of Obtaining and Analysis. — Moscow: Radio i svyaz, 1982. —184 p. (In Russian)].
17. *Топка В.В.* Минимизация стоимости проекта большой размерности при ограничении на его показатель надежности и линейных связях между переменными // Тр. Ин-та системного анализа РАН. — 2014. — № 4. — С. 19—32. [*Topka, V.V.* Minimizing the Cost of the Project of Large Dimension with a Restriction on its Reliability and Linear Relationships Between Variables // Proceedings of Institute for System Analysis of RAS. — 2014. — No. 4. — P. 19—32. (In Russian)]
18. *Топка В.В.* Управление стоимостью проекта с учетом показателя его надежности // Информационные технологии. — 2012. — № 2 (186). — С. 60—66. [*Topka, V.V.* Project Cost Management under Taking into Account its Reliability Index // Information Technologies. — 2012. — No. 2 (186). — P. 60—66. (In Russian)]
19. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию: изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Ленанд, 2014. — 263 с. [*Polyak, B.T.* Introduction to optimization: 2nd ed. — Moscow: Lenand, 2014. — 263 p. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Топка Владимир Владимирович — канд. техн. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ topka3@mail.ru.

Поступила в редакцию 16.07.2018, после доработки 17.01.2019.
Принята к публикации 6.02.2019.

EXTENDED MODEL OF THE INNOVATIVE PROJECT WITH BINARY INTERACTION OF ITS ACTIVITIES

V.V. Topka

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ topka3@mail.ru

Abstract. The innovative project is considered, whose activities are in interaction: technological, resource, probabilistic, budgetary, and other. It is noted that the binary mutual impact of activities within the project by probability leads to a synergistic effect: the joint implementation of two or more project activities can enhance (or weaken) their resulting effect. The logistic model of cross-impact registration is constructed for the technological network of the innovative project. The problem of finding the joint probabilities values for the technical success of the project activities implementation is considered and solved, as well as the problem of the cost minimization in the extended model of the innovative project.

Keywords: innovation project, cross-impact analysis, logistic model, joint estimations, project cost, linearization method.