УДК 330.4

ВЫБОР АНТИРИСКОВЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

А.С. Птускин[1], **Е.В. Левнер**[2]

[1]Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация
e-mail: aptuskin@mail.ru

[2]Академический колледж, Ашкелон, Израиль
e-mail: eli_levner@bezeqint.net

Рассмотрена проблема выбора стратегических программ, предназначенных для минимизации потерь, вызванных отказами и другими нежелательными событиями в цепи поставок. Предложено решать проблему в два этапа. На первом этапе выполняется идентификация наиболее информативных компонентов (подсистем) цепи с точки зрения количества содержащейся в них информации о рисках и соответствующих потерях, что позволяет минимизировать объем данных, уменьшить размер графа цепи и в результате упростить процедуру выбора на втором этапе. Для измерения информативности подсистем сложных цепей поставок предложено использовать информационную энтропию Шеннона. На втором этапе на упрощенном графе цепи поставок решена математическая задача выбора портфеля антирисковых программ, которая представлена как проблема математического программирования рюкзачного типа. Предложен новый алгоритм решения задачи выбора антирисковых программ.

***Ключевые слова*:** управление цепями поставок, риск, энтропия, выбор антирисковых программ.

SELECTION OF ANTI-RISK PROGRAMS FOR REDUCING LOSSES ON SUPPLY CHAINS

A.S. Ptuskin[1], **E.V. Levner**[2]

[1]Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga, Russian Federation
e-mail: aptuskin@mail.ru

[2]Ashkelon Academic College, Ashkelon, Israel
e-mail: eli_levner@bezeqint.net

A problem to select strategic programs destined for reducing losses induced by failures or other undesirable events in the supply chain is considered. It is offered to solve the problem in two stages. At the first stage, the identification of most informative components (subsystems) of the chain is performed from the standpoint of amount of the information on risks and appropriate losses, which makes it possible to minimize the data volume, to reduce a size of the chain graph and, as a result, to simplify the selection procedure at the second stage. Using Shannon's information entropy is proposed for measuring the self-descriptiveness of subsystems of complex supply chains. At the second stage, a mathematical problem for selecting the anti-risk program portfolio (presented as a problem of mathematical programming of knapsack type) is solved on the simplified graph of supply chain. A new algorithm of solving the problem for anti-risk program selection is proposed.

Keywords*: *supply chain management, risk, entropy, selection of anti-risk programs.

Как свидетельствует мировая практика, за счет создания цепей поставок может быть получено конкурентное преимущество во многих отраслях промышленности. Одной из ключевых проблем в достижении эффективности функционирования цепи поставок является разработка и реализация экономически обоснованных мероприятий, направленных на уменьшение исходного уровня хозяйственного риска на производстве [1]. Для цепи поставок такими мероприятиями или программами могут быть программы и проекты внедрения технологических и управленческих инноваций, модернизации, технического перевооружения, реконструкции, совершенствования информационных систем, повышения квалификации персонала и другие проекты, позволяющие минимизировать экономические потери в цепи, вызванные отказами и другими нежелательными событиями.

В настоящей работе рассматривается проблема формирования оптимального портфеля стратегических антирисковых мероприятий и распределения средств между ними, которая состоит в определении узлов цепи, для которых эти программы будут реализованы, а также как будут распределены ресурсы между программами с учетом их стоимости, результатов и ограничений требуемых средств. Критерием выбора портфеля является максимизация экономического выигрыша за счет уменьшения ожидаемых экономических потерь, порождаемых рисками в цепи поставок.

В современной экономической литературе существует несколько различных определений терминов *цепь поставок* и *управление цепями поставок* [2]. Мы будем понимать под *цепью поставок* сеть связанных партнерскими отношениями, а также материальными, информационными и финансовыми потоками, предприятий (производителей, поставщиков, логистических компаний, дистрибьюторов и т.д.), которые осуществляют весь производственный цикл превращения сырья, материалов и комплектующих в готовую продукцию, и поставляют продукцию конечным потребителям.

В определениях понятия *риск* также наблюдается значительное разнообразие [1, 3]. Как и многие другие авторы, будем определять *риск* как меру нежелательного развития процесса или явления в условиях неопределенности. При этом количественное определение риска должно учитывать возможность (вероятность) наступления неблагоприятных событий, а также оценку их последствий [4]. *Событие* — это заметное дискретное изменение в состоянии цепи поставок или ее компонентов. Мы рассматриваем негативные (или рисковые) события, для которых есть объективная возможность их зарегистрировать в течение определенного периода времени. Список таких событий,

называемый *протоколом риска*, предоставляет информацию о нежелательных событиях, их причинах и сопутствующих экономических потерях [1, 5]. Статистика, накопленная в протоколах риска, помогает количественно оценить вклад каждого фактора риска в общий объем и используется для прогноза экономического выигрыша за счет реализации антирисковых программ.

Драйвер риска или *фактор риска* — это причина нежелательного события в цепи поставок. Исходя из практических потребностей цепей поставок, будем разделять факторы риска в компонентах (узлах) цепи поставок на внутренние и внешние. Внутренними являются те факторы риска, которые обусловлены или порождаются деятельностью самого узла цепи поставок, а к внешним относятся факторы риска, источники возникновения которых кроются во внешней по отношению к рассматриваемому узлу среде. К внутренним относятся технологические риски (аварии оборудования, нарушения технологии, сбои в энергоснабжении, аварии складских мощностей и др.), организационные (например, ошибка при планировании выполнения заказа, изменения в структуре цепи поставок) и информационные (потеря информации во внутренней сети, отказ сервера, сбой программы обработки информации). Проявлением внешних факторов рисков, т.е. связанных с поставщиками нижеследующего уровня, может быть отсутствие поставок из дочерних узлов или их низкое качество, а также недостаток поставок из дочерних узлов.

Видовое разнообразие рисков, факторов риска и способов их выражения велико. Чтобы определить действия, направленные на уменьшение уровня риска в цепи поставок, необходимо получить и обработать данные об отказах и сбоях, их причинах и экономических последствиях, местах и частоте возникновения. Однако объем этих данных может быть огромным, учитывая большое число узлов цепи, количество которых достигает сотен и тысяч. Кроме того, бюджет для стратегических программ, направленных на сокращение уровня рисков, ограничен. Поэтому анализ рисков всех компонентов цепи поставок или их большинства становится невозможным и нецелесообразным. Необходимо "сжать" огромный объем информации о рисках в цепи поставок, чтобы идентифицировать только те из ее компонентов, которые являются главными причинами экономических потерь и, следовательно, главными целями программ, нацеленных на сокращение рисков. Поэтому на первом этапе мы рассматриваем проблему идентификации самых информативных компонентов цепи с точки зрения количества информации о рисках и соответствующих потерях и предлагаем процедуру, которая позволяет сократить размерность структуры модели цепи поставок без потери информативности данных о сбоях и отказах, их причинах и экономических последствиях [5]. Для измерения

информативности подсистем сложных цепей поставок мы используем информационную энтропию Шеннона.

После решения задачи упрощения структуры модели цепи поставок предлагается исследовать модель выбора оптимального набора предотвращающих риск стратегических программ с учетом информативности, определенной для каждой подсистемы цепи, а также стоимости и экономического воздействия каждой программы при заданном ограничении бюджета. Стратегии определяются выявленными частотами проявления факторов риска и соответствующими экономическими потерями.

Структура статьи отражает два указанных этапа. Сначала рассматривается проблема идентификации наиболее информативных компонентов и сокращения размера модели цепи поставок. В качестве инструмента, позволяющего оценивать знания о рисках, используется информационная энтропия Шеннона. Далее приведена модель выбора портфеля антирисковых стратегических мероприятий как блочная задача математического программирования рюкзачного типа с неточными данными. Предложен двухэтапный алгоритм, включающий редукцию переменных на основании априорной быстрой фиксации значений некоторых переменных и определение оптимальных значений оставшихся переменных с применением динамического программирования.

Модель структуры цепи поставок. Как правило, цепь поставок имеет многоуровневую иерархическую структуру и состоит из большого числа подсистем. Графическое представление цепи поставок и ее подсистем можно выполнить с различной степенью детализации.

Цепь поставок может быть представлена в виде графа многоуровневой иерархической структуры, имеющего один или несколько родительских узлов. На рис. 1 показана цепь поставок, в которой имеется одна центральная (фокальная) компания, имеющая поставщиков нескольких уровней и дистрибьюторов, поставляющих продукцию потребителям. Классический пример подобной структуры — цепь поставок в автомобильной промышленности. Здесь фокальным (или *родительским*) узлом является автопроизводитель.

Современный автомобиль состоит приблизительно из 15 000 узлов и частей [6]. Поставщики автопроизводителя и дилеры могут быть разделены на несколько уровней. Автопроизводитель разрабатывает и производит только некоторые из этих 15 000 узлов и частей, остальные получает от поставщиков первого уровня. Как показано на рис. 1, в этой схеме автомобильной цепи поставок автопроизводитель — это центральный узел, его поставщики составляют “левое крыло” цепи, дилеры и потребители составляют “правое крыло” цепи. Для упрощения в схему не включены логистические предприятия.

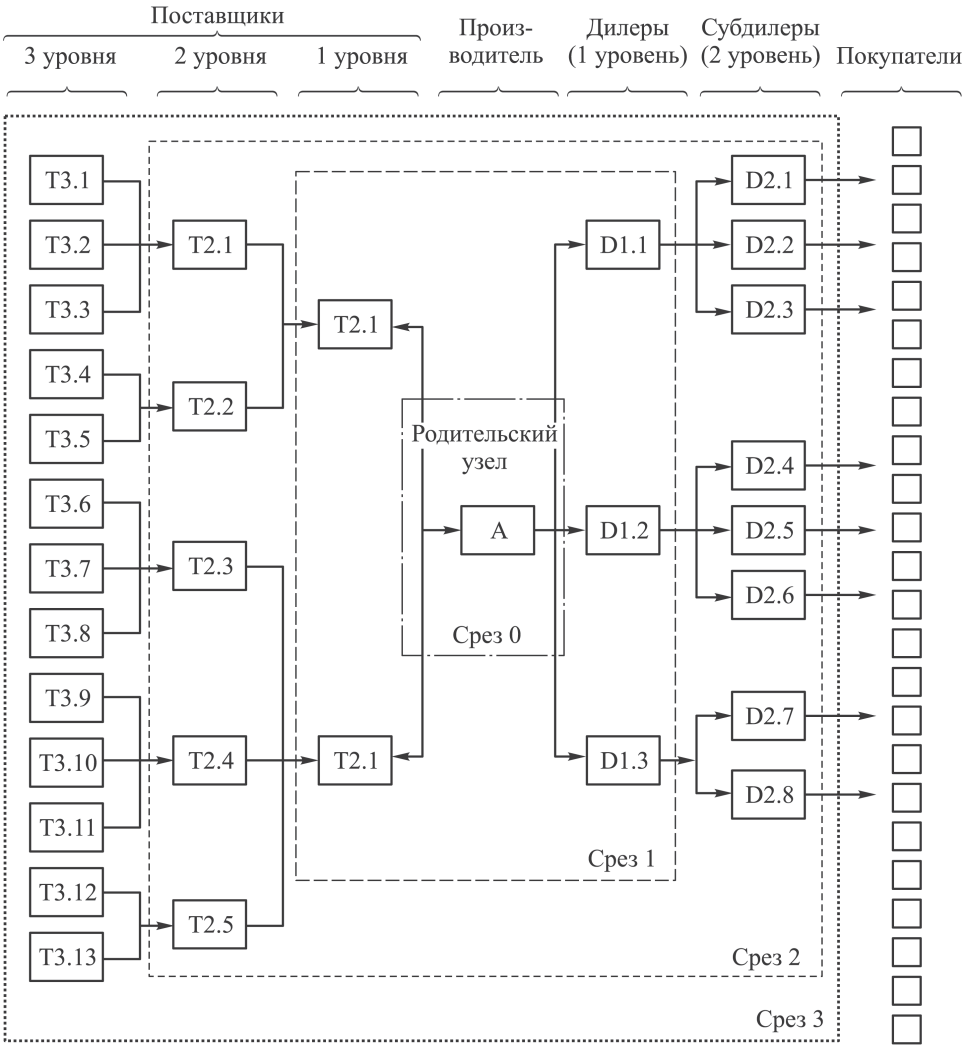

Рис. 1. Узлы, уровни и срезы цепи поставок

Поясним смысл используемых терминов *узел*, *уровень* и *срез*. Каждый узел в графе представляет компанию, входящую в цепь поставок (это поставщики, производители, логистические компании, оптовые торговцы/дистрибьюторы, ритейлеры).

Кроме родительского узла A, каждый узел может принадлежать уровням двух типов: уровню поставки или уровню дилера, на рисунке соответственно $T_{k,t}$ или $D_{k,t}$. *Уровень* — это множество узлов, находящихся на одинаковом расстоянии от родительского узла. Так, узлы $T_{1,t}$ (соответственно $D_{1,t}$), $t = 1, 2, 3, \ldots$, составляют первый уровень прямых поставщиков (соответственно прямых дистрибьюторов) автопроизводителя; узлы $T_{k,t}$ (соответственно $D_{k,t}$), $t = 1, 2, 3, \ldots$, составляют уровень k и являются прямыми поставщиками (или соответственно прямыми дистрибьюторами) узлов уровня $k - 1$, $k = 2, 3, \ldots$.

Понятие среза служит для последовательного изображения всей цепи поставок в многоступенчатом процессе ее детализации. Начальный срез содержит только родительский узел. Далее, срез 1 является объединением родительского узла и всех узлов (поставщиков и дистрибьюторов) первого уровня. В общем случае, срез s определяется рекурсивно: он является объединением родительского узла и всех узлов уровней от 1 до s. Каждый срез с номером s содержит все узлы среза с номером $(s-1)$ и дополнительно к ним узлы уровня s. В содержательных терминах каждый последующий срез описывает ту же самую цепь поставок, но с большей степенью детализации. Будем называть структуру цепи поставок s усеченной, если она представлена срезом с номером s. Из рис. 1 следует, что при переходе от среза к срезу мы получаем модель с большим числом узлов и более подробным изображением той же самой цепи поставок. На рис. 1 срезы с номером 4 и выше не показаны.

Далее для каждого среза будем определять его информативность, т.е. оценивать уровень нашего знания относительно проявившихся факторов риска в цепи поставок и соответствующих экономических потерях, а в качестве меры информативности использовать шенноновскую энтропию. Основываясь на этой информации, мы хотим получить прогноз о том, какие факторы риска и для каких узлов цепи являются самыми опасными и могут привести к экономическим потерям в будущем. Однако объем такой информации чрезвычайно велик, ее сбор, хранение и анализ становятся сложной, практически не поддающейся решению проблемой [7]. Естественный способ решения состоит в том, чтобы сократить объем информации, не теряя существенной необходимой информации, определить тот объем, который достаточен для наших целей. В результате набор выявленных наиболее существенных факторов риска и наиболее уязвимых компонентов цепи поставок становится более компактным и более управляемым. Кроме того, более управляемым и прозрачным становится набор стратегических решений, нацеленных на сокращение рисков.

Протоколы риска. Энтропийный подход. Для каждого узла v в цепи поставок формируется информационная база данных, называемая *протоколом риска*. Как было указано ранее, это список негативных (рисковых) событий, которые произошли в узле во время определенного периода времени с описанием фактора риска, ставшего причиной события, и размера экономических потерь [1]. Эти данные могут быть представлены в виде таблицы T_v, каждая строка которой соответствует событию, произошедшему в данном узле в определенный момент времени (см. табл. 1). Столбцы таблицы от 1 до F, соответствуют факторам риска. В строке также указано, привело ли событие к экономической потере. Для этого используется столбец $F+1$.

В последнем столбце указан размер экономических потерь. Будем использовать символ f в качестве индекса фактора риска; F — общее число факторов риска; r — индекс события; R — число событий в течение рассматриваемого периода времени; l_r — размер экономических потерь за счет события r.

T_v-список рисковых событий в узле

События	Факторы риска						$(F+1)$	Потери
	1	...	...	f	...	F		
1	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...		...	...	...	...	...	...
r	...	...	...	$x_{rf} = 0$ или 1	...	...	$x_{r,F+1} = 0$ или 1	l_r
...	...	...	...	...	...	...	...	...
R	...	...	...	...	...	...	...	...

В ячейках таблицы записываются значения x_{rf} , равные нулю или единице. Значение x_{rf} в пересечении колонки f и строки r равно единице, если фактор риска f, стал причиной события, соответствующего строке r, и нулю — в противном случае. Столбец $F+1$ показывает результат события: $x_{r,F+1} = 1$, если событие r привело к существенной экономической потере (такие события будем называть критическими); $x_{r,F+1} = 0$, если, несмотря на то, что фактор f проявился в событии r, экономической потери не произошло. Последний столбец показывает размер экономических потерь l_r. Понятно, что если $x_{r,F+1} = 0$, то и $l_r = 0$.

На основании данных протоколов риска предлагается идентифицировать те компоненты цепи поставок, которые являются основными источниками информации об экономических потерях. Во многих работах в качестве меры для оценки и анализа сложности производственных систем используется шенноновская энтропия, которую многие авторы успешно связывают с измерением структурной и информационной сложности. Например, Карп и Ронен [8] использовали шенноновскую энтропию, чтобы показать, что переход к более мелким партиям в производстве может уменьшить информационные затраты при планировании. Энтропия для оценки уровня сложности производственных систем, включая и цепи поставок, и измерения степени полноты знания об их состоянии используется в работах [9–11]. Мы продолжаем эту линию исследования и используем энтропию в качестве меры нашего знания о том, где сконцентрированы самые важные источники рисков в цепи поставок.

Информационная энтропия по Шеннону определяется следующим образом [12]. Для группы событий $E = \{e_1 \ldots, e_n\}$ с априорными вероятностями возникновения событий $P = \{p_1 \ldots, p_n\}$, таких, что

$p_i + \ldots + p_n = 1$, функция энтропии H определяется как

$$H = -\sum_{i=1,\ldots,n} p_i \log\ p_i. \qquad (1)$$

Эта мера определяет уровень неопределенности в предсказании результатов случайного эксперимента: возникновение событий, у которых очень высокая или очень низкая вероятность возникновения, связано с более низкой неопределенностью, чем возникновение событий, для которых вероятность близка к 0,5. Чем меньше неопределенность, тем меньше требуется дополнительной информации для предсказания таких событий.

Энтропийный подход к упрощению модели структуры цепи поставок разработан в работе [5]. Однако здесь рассматривается только самая простая конфигурация цепи поставок, состоящая из фокальной компании и ее поставщиков, не учитывается группа рисков, связанная с продвижением готового продукта к конечному потребителю. В настоящей работе мы развиваем энтропийный подход для более полной конфигурации цепи поставок.

Выбор наиболее информативных компонентов цепи поставок. Имея таблицы T_v списков рисковых событий для всех узлов, принадлежащих определенному произвольному срезу s, мы можем объединить эти таблицы и получить подобную таблицу CT_s для всего среза. Строки этой таблицы — совокупность строк всех таблиц T_v для узлов, входящих в срез s. Пусть R_v — общее число событий (строк) таблицы T_v. Если срез sсодержит $n(s)$ узлов, то в таблице CT_s общее число строк $R^s = \sum\limits_{v=1,\ldots,n(s)} R_v$.

Для каждого фактора риска f ($f = 1, \ldots, F$) определим $N_s(f)$ — общее число строк в таблице CT_s, для которых причиной критических событий стал фактор f, т.е. число строк, для которых в колонке $F+1$ значение ячейки $x_{r,\ F+1} = 1$. Рассмотрим следующее событие $A(f, s)$:

$A(f, s) = \{$ фактор f является причиной критических событий в узлах среза $s\}$.

Относительная частота $p_s(f)$ события $A(f, s)$ рассматривается как оценка вероятности события $A(f, s)$ и вычисляется для всего среза s следующим образом:

$$p_s(f) = N_s(f)/N_s, \qquad (2)$$

где N_s — общее число критических событий (т.е. строк со значением единица в колонке $F+1$) в таблице CT_s. Тогда очевидно, что $\sum\limits_f p_s(f) = 1$. Смысл последнего выражения состоит в том, что каждая строка r в таблице CT_s имеет не более одного фактора f, для которого $x_{rf} = 1$ и, следовательно, относительная доля проявлений фактора f среди всех факторов в срезе s равняется $N_s(f)/\sum\limits_f N_s(f)$.

Для упрощения полагаем, что рассматриваемые критические события независимы, а риски аддитивны, т.е. общие экономические потери в системе складываются из потерь в компонентах системы.

Теперь обратимся к вычислению энтропии. Величины $p_s(f)$, определенные по формуле (2), рассматриваются как априорные вероятности соответствующих событий. Предположим, что мера информативности должна отражать не только вероятности потерь, но и их размер, для этой цели расширим определение энтропии (1) и введем в определение энтропии среза s дополнительный множитель, называемый экономическим весом $c(s)$.

Тогда энтропия s-усеченной структуры данной цепи поставок (т.е. энтропия среза s) определяется следующим образом:

$$H(s) = -c(s) \sum_f p_s(f) \log p_s(f). \tag{3}$$

Рассмотрим один из возможных путей определения веса $c(s)$. Пусть L — размер экономических потерь во всей цепи поставок. Полагаем, что эта величина известна из протоколов риска для родительского узла. Обозначим через L_s сумму потерь, определенную протоколами риска всех узлов, входящих в срез s. Тогда доля потерь за счет событий, произошедших в срезе s, в общем объеме потерь будет равна L_s/L. Доля потерь за счет событий, произошедших в узлах уровней $s+1$, $s+2, s+3, \ldots$, в общем объеме потерь будет равна $L - L_s/L$. Это аргумент в пользу следующего определения экономического веса: $c(s) = L - L_s/L$. С ростом s этот вес уменьшается, информации о весе просмотренных уровней цепи в общем объеме критических потерь становится больше, а неопределенность в отношении размера экономических потерь уменьшается.

Следующее утверждение устанавливает важную закономерность в поведении энтропии s-усеченных структур.

Утверждение 1. Энтропия s-усеченной структуры $H(s)$ монотонно уменьшается с увеличением s (т.е. при детализации структуры цепи поставок) и асимптотически приближается к нулю при достаточно больших значениях s.

Это утверждение следует из того факта, что $L - L_s/L$ монотонно уменьшаются с увеличением s, а $\sum\limits_{f=1,\ldots,F} p_s(f) \log p_s(f)$ ограничена сверху $\log F$.

Утверждение 2. При последовательном построении структуры цепи поставок срез за срезом дальнейшая детализация нецелесообразна, когда снижение энтропии становится незначительным при переходе к последующему срезу, т.е. когда

$$(H(s-1) - H(s))/(H(1) - H(s)) < \varepsilon, \tag{4}$$

где ε — заданное пороговое значение относительного изменения энтропии.

Смысл данного утверждения состоит в том, что при разбиении каждого узла v на дочерние энтропия уменьшается, т.е. сумма энтропий в дочерних узлах меньше, чем энтропия родительского узла v. Казалось бы, это противоречит фундаментальному принципу теории информации, согласно которому энтропия любой системы меньше или, в крайнем случае, равна сумме энтропий всех входящих в нее частей. Ответ на этот "парадокс" прост. При движении от среза к следующему срезу мы получаем и используем дополнительную, более детальную информацию о том, в каких именно узлах цепи поставок произошли критические события, в каких количествах и какие экономические потери они вызвали, а также какова относительная информационная важность каждого среза модели цепи поставок. Никакого парадокса нет, потому что увеличение знания может только уменьшить энтропию.

Поскольку параметры, входящие в формулы (2)–(4), известны или могут быть легко вычислены, то можно определить число срезов s^*, обеспечивающих необходимое приближение модели структуры цепи поставок с заданным пороговым значением ε. Полученная с помощью энтропийной меры информация о самых важных компонентах цепи поставок, содержащихся в первых s^* уровнях, достаточна для формирования практически приемлемого портфеля антирисковых мероприятий.

Подробный пример, иллюстрирующий процедуру отбора наиболее информативных компонентов цепи поставок для упрощения структуры модели цепи и сокращения ее размерности на примере реального фрагмента цепи поставок в автомобильной промышленности, представлен в работе [5]. В настоящей работе ограничимся только демонстрацией энтропии срезов для цепи поставок, показанной на рис. 1. Опуская вычисления, которые заинтересованный читатель может найти в [5], динамика энтропии s-усеченных структур для различных значений s показана на рис. 2.

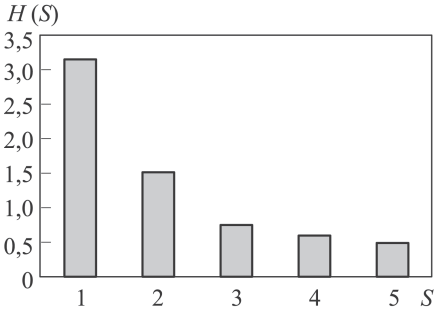

Рис. 2. Динамика энтропии s-усеченных структур

Наблюдается уменьшение энтропии для номеров срезов 1, 2, 3, а при переходе от среза 3 к срезу 4 относительное снижение энтропии становится незначительным. Например, при пороговом значении $\varepsilon = 0{,}1$ число срезов, обеспечивающих требуемое приближение по формуле (4), $s^* = 3$. Дальнейшая детализация модели структуры цепи поставок приводит к увеличению стоимости и

времени анализа риска, но не дает существенной информационной выгоды. Узлы среза 3 являются теми компонентами цепи поставок, которые станут объектами антирисковых программ на следующем этапе нашего анализа.

Эффективность основанной на энтропии процедуры позволяет получить информационно обоснованное упрощение модели цепи поставок с желаемым уровнем точности.

Модель выбора портфеля антирисковых программ. После того, как исходный граф цепи поставок упрощен, размерность задачи выбора портфеля антирисковых программ существенно снижается. Для каждого узла, включенного в модель, известны факторы риска, приведшие к событиям, которые мы называем критическими (т.е. ставшими причинами сбоев всей цепи), а также соответствующие экономические потери. В свою очередь для каждого фактора риска может быть определен набор экономически обоснованных компенсирующих мероприятий, направленных на предотвращение риска. Проблема заключается в минимизации экономических потерь в цепи поставок, вызванных отказами и другими нежелательными событиями, за счет оптимального формирования портфеля программ и распределения средств между ними с учетом их стоимости и результатов, а также ограничений требуемых ресурсов.

Для заданной цепи поставок общее число (H) возможных антирисковых программ считаем известным. Любой узел цепи поставок может быть включен (или не включен) в эти программы. Для каждой антирисковой программы определена верхняя граница ее бюджета, а также определен общий бюджет всех антирисковых программ. Известна стоимость реализации программы для каждого узла, в случае его включения в программу. Необходимо сформировать портфель антирисковых программ, т.е. определить для каких узлов цепи эти программы будут реализованы, распределить средства между программами с учетом их стоимости и результатов, а также ограничений требуемых средств. Критерием выбора портфеля является максимизация экономического выигрыша за счет уменьшения ожидаемых экономических потерь, порождаемых рисками в цепи поставок.

Введем следующие обозначения:

m — номер узла цепи ($m = 1, \ldots, M$, M — число узлов в цепи поставок); f — индекс фактора риска ($f = 1, \ldots, F$, F — общее число факторов риска, которые могут являться причинами сбоев в узлах цепи, приведших к экономическим потерям);

j_f — индекс антирисковой программы для предотвращения фактора риска f ($j_f = 1, \ldots, J_f$, J_f — количество антирисковых программ для нейтрализации фактора f; в дальнейшем мы будем опускать индекс f в символах j_f для упрощения обозначений); $b_{m,f,j}$ — стоимость реализации антирисковой программы j для предотвращения воздействия фактора риска f в узле m; $c_{m,f,j}$ — ожидаемый экономический

выигрыш за счет предотвращения воздействия фактора риска f в узле m при реализации антирисковой программы j в узле m; $B_{f,\ j}$ — верхняя граница бюджета программы j для предотвращения воздействия фактора риска f; B — общий стратегический бюджет всех антирисковых программ; $x_{m,\ f,\ j}$ — бинарный параметр (искомая переменная), отражающий, включен ли узел m в антирисковую программу j для предотвращения фактора риска f: $x_{m,f,j} = 1$, если включен, $x_{m,f,j} = 0$, если нет.

Критерий оптимизации портфеля программ может быть определен следующим образом:

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F}\sum_{j=1}^{Jf} c_{m,f,j}x_{m,f,j} \to \max. \tag{5}$$

Ограничения по общему стратегическому бюджету имеют вид

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F}\sum_{j=1}^{Jf} b_{m,f,j}x_{m,f,j} \le B. \tag{6}$$

Ограничения по бюджету программы j для предотвращения фактора риска f можно записать как

$$\sum_{m=1}^{M} b_{m,f,j}x_{m,f,j} \le B_{f,\ j};\quad f = 1,\ldots,F;\quad j = 1,\ldots,J_f, \tag{7}$$

где $\sum\limits_{f=1}^{F}\sum\limits_{j=1}^{Jf} B_{f,\ j} \le B.$

Ограничения на включение узла в заданное число антирисковых программ по каждому фактору:

$$\sum_{j=1}^{Jf} x_{m,f,j} \le H;\quad m = 1,\ldots,M;\quad f = 1,\ldots,F; \tag{8}$$

$$x_{m,f,j} = 0 \vee 1;\quad m = 1,\ldots,M;\quad f = 1,\ldots,F;\quad j = 1,\ldots,J_f. \tag{9}$$

Задача выбора портфеля антирисковых программ формулируется следующим образом: определить все $x_{m,f,j}$, $m = 1,\ldots,M$; $f = 1,\ldots,F$; $j = 1,\ldots,J_f$, обеспечивающие максимум (5) при ограничениях (6)–(9).

Модель (5)–(9) выражает в математических терминах задачу выбора портфеля антирисковых программ. Для описания вычислительного метода ее решения представим целевую функцию и ограничения в ином виде. Для этого заменим двух- и трехиндексные массивы параметров на одноиндексные массивы. Общее число антирисковых программ определяется как $L = J_1 + J_2 + \ldots + J_f + \ldots + J_F$. Тогда размерность вновь вводимых массивов определяется как $K = L \times M$.

Вместо трехмерного массива $x_{m,\ f,\ j}$ (это бинарный параметр — искомая переменная, отражающий, включен ли узел m в антирисковую программу j для предотвращения фактора риска f) будем использовать одномерный массив y_k ; k = 1, ... , K.

Вместо трехмерного массива $b_{m,f,j}$ (стоимость реализации антирисковой программы j для предотвращения фактора риска f в узле m) будем использовать одномерный массив a_k $(k = 1, \ldots, K)$. Вместо трехмерного массива $c_{m,\ f,\ j}$ (ожидаемый экономический выигрыш за счет предотвращения фактора риска f в узле m при реализации антирисковой программы j в узле m) будем использовать одномерный массив p_k $(k = 1, \ldots, K)$. Вместо двумерного массива $B_{f,\ j}$ (верхняя граница бюджета программы j для предотвращения фактора риска f) будем использовать одномерный массив d_k $(k = 1, \ldots, K)$. Например, соответствие новых параметров и используемых в модели (5)–(9) выражается следующим образом: $y_1 = x_{1,1,1}; \ldots; y_K = x_{M,F,JF}$; $a_1 = b_{1,1,1}; \ldots; a_K = b_{M,F,JF}$; $d_1 = B_{1,1}; \ldots d_l = B_{F,JF}$; $p_1 = c_{1,1,1}$; $p_2 = c_{2,1,1}; \ldots$; $p_M = c_{M,1,1}$; $p_{M+1} = c_{1,1,2}; \ldots$; $p_K = c_{M,F,JF}$. Компьютерная программная реализация такого перехода не вызывает проблем.

Используя новые обозначения, можно представить модель (5)–(9) в виде блочной задачи о рюкзаке следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{K} p_k y_k \to \max . \tag{10}$$

Ограничения по общему стратегическому бюджету:

$$\sum_{k=1}^{K} a_k y_k \le B. \tag{11}$$

Ограничения по бюджету программы j для предотвращения воздействия фактора риска f:

$$\sum_{k=(l-1)M}^{lM} a_k y_k \le d_l; \quad l = 1, \ldots, L, \tag{12}$$

где $\sum_{l=1}^{L} d_l \le B$.

Ограничения на включение узла в заданное число H антирисковых программ:

$$\sum_{l=1}^{L} y_{(l-1)M+i} \le H; \quad i = 1, \ldots, M. \tag{13}$$

Бинарный характер искомых переменных:

$$y_k = 0 \vee 1; \quad k = 1, \ldots, K. \tag{14}$$

Двухэтапный алгоритм решения задачи выбора портфеля антирисковых программ. За основу метода решения нами взят алгоритм редукции переменных, предложенный в работе [13] для одномерной задачи с одним ограничением вида (11), эффективность которого подтверждена многочисленными вычислительными экспериментами. Процесс решения задачи разбивается на два этапа: первый – редукция переменных, ведущая к значительному сокращению размерности задачи, и второй – определение оптимальных значений оставшихся (нерудицированных) переменных за счет эффективного использования динамического программирования.

Рассмотрим эти этапы для блочной задачи (10)–(14) более детально.

Для редукции переменных прежде всего перенумеруем элементы $k = 1, \ldots, K$ таким образом, чтобы $(p_k/a_k) \geq (p_{k+1}/a_{k+1})$; $k = 1, \ldots, K-1$.

Обозначим через P^* оптимальное значение целевой функции задачи при условии, что переменные y_k не булевы, а принимают значения $0 \leq y_k \leq 1$. Значение P^* легко определяется стандартными методами линейного программирования. Величина $[P^*]$ является верхней границей оптимального решения основной задачи (здесь $[P^*]$ — целая часть P^*).

Определим любое допустимое решение, последовательно присваивая $y_k = 1$, начиная с $k = 1$, до тех пор, пока выполняются ограничения (11)–(13), а затем, пробуя дополнить этот набор следующими элементами с учетом этих же ограничений.

Пусть P^0 наилучшее значение целевой функции исходной задачи с булевыми переменными, известное к данному шагу (это так называемый текущий рекорд). Идея редукционного алгоритма состоит в том, что вначале всем переменным y_k поочередно присваивается значение нуль и подсчитывается соответствующее значение верхней границы оптимального решения исходной задачи при фиксированном значении k-й переменной $P^*(k)$. Очевидно, что если $[P^*(k)] < P^0$, т.е. даже верхняя граница оптимального решения исходной задачи при фиксированном значении меньше уже имеющегося целочисленного решения, то существует оптимальное целочисленное решение задачи, в котором переменная $y_k = 1$. Затем переменным y_k поочередно присваивается значение единицы и также подсчитывается соответствующее значение верхней границы оптимального решения при фиксированном значении k-й переменной $P^*(k)$. Очевидно, что если $[P^*(k)] < P^0$, то существует оптимальное целочисленное решение задачи, в котором переменная $y_k = 0$.

Эти значения переменных фиксируются; тогда говорим, что переменные редуцируются. На каждом шаге $k = 1, \ldots, 2K$ проводится попытка улучшения рекорда P^0.

Множество переменных, которые не удалось зафиксировать после испытания всех переменных, назовем ядром задачи. На втором этапе с применением алгоритма динамического программирования происходит обработка полученного ядра, т.е. определение его переменных.

Обозначим число незафиксированных переменных через R. Алгоритм динамического программирования состоит из R шагов. На каждом шаге $r, r = 1, \ldots, R$ формируется некоторое специальное множество допустимых решений S^r. На первом шаге полагаем

$$S^1 = \{\underbrace{(0, 0, \ldots, 0)}_{R}, \}, \underbrace{(1, 0, \ldots, 0)}_{R}\}.$$

Пусть на $(r-1)$-м шаге $(r \geq 2)$ получено множество S^{r-1}. Векторы, определяющие решения, входящие в S^{r-1}, имеют вид $y^{r-1} = (y_1, \ldots, y_{r-1}, 0, \ldots, 0)$.

На r-м шаге с множеством S^{r-1} проводятся следующие операции:

1) “r-сдвиг” — из каждого вектора $y^{r-1} \in S^{r-1}$ формируется вектор $y^r = (y_1, \ldots, y_{r-1}, 1, 0, \ldots, 0)$;

2) “упорядочение” — все векторы y^r вместе с векторами y^{r-1} располагаются в порядке неубывания величин $P(y)$, где $P(y)$ — значение целевой функции для вектора y;

3) “первое выбрасывание” — в полученном упорядоченном множестве выбираются те векторы y, для которых имеются доминирующие (вектор u называется доминирующим над вектором z, если $P(u) \geq P(z)$ и $a(u) \leq a(z)$);

4) “второе выбрасывание” — выбрасываются векторы y, для которых не выполняются ограничения (11)–(13).

Оставшиеся векторы образуют множество S^r. Вектор y в S^r с наибольшим значением $p(y)$ является точным решением ядра задачи. Решение задачи завершается путем объединения значений переменных, найденных на первом и втором этапах.

Заключение. Проблема выбора антирисковых программ для уменьшения уровня риска является одной из ключевых в достижении эффективности функционирования цепи поставок. В рамках настоящей статьи получены следующие результаты.

1. Предложена вычислительная процедура для сокращения размера модели цепи поставок без потери наиболее существенной информации о рисках и их экономических последствиях.

2. Построена модель выбора оптимального набора предотвращающих риск программ с учетом стоимости и экономического воздействия каждой программы и бюджетных ограничений. Критерий для оптимального стратегического выбора — ожидаемый экономический выигрыш за счет уменьшения уровня риска. Модель представлена как задача математического программирования на s^*-усеченной структуре цепи поставок.

3. Разработан двухэтапный алгоритм решения задачи по оптимальному выбору стратегических программ, минимизирующих потери.

В продолжение настоящего исследования представляет интерес дальнейшее развитие эффективных вычислительных методов решения этой задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда и Правительства Калужской области (проект № 12-12-40006а(р)).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Качалов Р.М.* Управление экономическим риском. М.: ООО “Нестор–История”, 2012. 248 с.
2. *Федотов Ю.В.*, *Кротов К.В.* Управление цепями поставок: проблемы определения термина и области исследований // Российский журнал менеджмента. 2011. Т. 9. № 2. С. 49–58.
3. *Виленский П.Л.*, *Лившиц В.Н.*, *Смоляк С.А.* Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. М.: Дело, 2008. 888 с.
4. *Levner E.*, *Proth J.-M.* Strategic management of ecosystems: A supply chain perspective / In E. Levner, I. Linkov, J.-M. Proth (eds). Strategic Management of Ecosystem. 2005. Springer. P. 95–107.
5. *Птускин А.С.*, *Левнер Е.В.* Энтропийный подход к упрощению структуры цепи поставок для выбора антирисковых стратегических решений // Экономическая наука современной России. 2012. № 4 (59). С. 76–90.
6. *White W.J.*, *O’Connor A.C.*, *Rowe B.R.* Economic impact of inadequate infrastructure for supply chain integration / Final report RTI 07007.013. National Institute of Standards and Technology. May 2004. http://www.nist.gov/director/planning/upload/report04-2.pdf.
7. *Jeeva A.S.* Reducing supply risk caused by the stockwhip effect in supply chains // Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2011. Kuala Lumpur (Malaysia), January 22–24. P. 739–744.
8. *Karp A.*, *Ronen B.* Improving shop floor control: an entropy model approach // International Journal of Production Research. 1992. Vol. 30. No. 4. P. 923–938.
9. *Martinez-Olvera C.* Entropy as an assessment tool of supply chain information sharing // European Journal of Operational Research. 2008. No. 185. P. 405–417.
10. *Allesina S.*, *Azzi A.*, *Battini D.*, *Regattieri A.* Performance measurement in supply chains: new network analysis and entropic indexes // International Journal of Production Research. 2010. Vol. 48 (8). P. 2297–2321.
11. *Isik F.* An Entropy-Based Approach for Measuring Complexity in Supply Chains // International Journal of Production Research. 2010. Vol. 48. No. 12, January. P. 3681–3696.
12. *Shannon C.E.* A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27 (3). P. 379–423.
13. *Ingargiola G.P.*, *Korsh J.F.* Reduction algorithm for zero-one single knapsack problems // Management Science. 2010. Vol. 20 (4). Part 1. P. 460–463.

REFERENCES

[1] Kachalov P.M. Upravlenie ekonomicheskim riskom [Management of economic risk]. Moscow, OOO “Nestor-Istoriya” Publ., 2012. 248 p.

[2] Fedotov Yu.V., Krotov K.V. Supply chain management: definition problems of the term and field of exploration. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta* [Russian Management Journal], 2011, vol. 9, no. 2, pp. 49–58 (in Russ.).

[3] Vilenskiy P.L., Livshits V.N., Smolyak S.A. Otsenka effektivnosti investitsionnykh proektov: teoriya i praktika [Evaluating the effectiveness of investment projects: theory and practice]. Moscow, Delo Publ., 2008. 888 p.
[4] Levner E., Proth J.-M. Strategic management of ecosystems: A supply chain perspective. Ch. 2. *Collect. Pap. "Strategic Management of Marine Ecosystems"*. Ed. Levner E., Linkov I., Proth J.-M. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Series, Springer, 2005, vol. 50, pp. 95–107. DOI: 10.1007/1-4020-3198-X_6
[5] Ptuskin A.S., Levner E.V. Entropy approach to simplify of the supply chain structure to select antirisk strategic decisions. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii* [Economic Science of Contemporary Russia], 2012, no. 4 (59), pp. 76–90 (in Russ.).
[6] White W.J., O'Connor A.C., Rowe B.R. Economic impact of inadequate infrastructure for supply chain integration. *Final report RTI 07007.013*, National Inst. of Standards and Technology, May, 2004.
[7] Jeeva A.S. Reducing supply risk caused by the stockwhip effect in supply chains. *Proc. 2011 International Conf. on Ind. Engin. And Operations Management*, 2011, Kuala Lumpur (Malaysia), January 22–24, pp. 739–744.
[8] Karp A., Ronen B. Improving shop floor control: an entropy model approach. *Int. J. Production Research*, 1992, vol. 30, no. 4, pp. 923–938.
[9] Martinez-Olvera C. Entropy as an assessment tool of supply chain information sharing. *European J. Operational Research*, 2008, no. 185, pp. 405–417.
[10] Allesina S., Azzi A., Battini D., Regattieri A. Performance measurement in supply chains: new network analysis and entropic indexes. *Int. J. Production Research*, 2010, vol. 48 (8), pp. 2297–2321.
[11] Isik F. An Entropy-Based Approach for Measuring Complexity in Supply Chains. *Int. J. Production Research*, 2010, vol. 48, no. 12, pp. 3681–3696.
[12] Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Tech. J.*, 1948, vol. 27 (3), pp. 379–423.
[13] Ingargiola G.P., Korsh J.F. Reduction algorithm for zero-one single knapsack problems. *Management Science*, 2010, vol. 20 (4), part 1, pp. 460–463.

Статья поступила в редакцию 14.10.2013

Птускин Александр Соломонович — д-р экон. наук, профессор кафедры "Экономика и организация производства" Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 92 научных работ в области экономико-математического моделирования, теории нечетких множеств и ее применения в промышленности, бизнеса и финасов, стратегического управления, инвестиций, анализа рисков, искусственного интеллекта.
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 248000 г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.
A.S. Ptuskin — Dr. Sci. (Econ.), professor of "Economics and Organization of Production" department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 92 publications in the field of economical and mathematical simulation, theory of fuzzy sets and its applications in the industry, business and finance, strategic management, investments, risk assessment, artificial intelligence, theory of scheduling, supply chain management.
Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, Kaluga, 248000 Russian Federation.

Левнер Евгений — д-р философии, профессор Ашкелонского Академического колледжа. Автор 88 научных работ в области экономико-математического моделирования, исследования операций, теории нечетких множеств, анализа рисков, теории расписаний, управления цепями поставок.
Академический колледж, Израиль 78211, Ашкелон, ул. Бен-цви, 12.
E.V. Levner — PhD, Professor at the Ashkelon Academic College. Author of 88 publications in the field of economical and mathematical simulation, operations research, theory of fuzzy sets, risk assessment, theory of scheduling, supply chain management.
Ashkelon Academic College, 12 Ben Zvi St., Ashkelon, 78211 Israel.