коэффициента искажения по абсолютной величине не будет превышать 0,1 %. В то же время для полиномиальных моделей, полученных на основе стандартных планов вычислительного эксперимента на два фактора, ошибка определения коэффициента искажения по абсолютной величине не будет превышать 0,1 % лишь с вероятностью 92,56 %.

Список литературы

1. *Зубарев Ю. Я.* Планирование вычислительного эксперимента в электроэнергетике / Ю. Я. Зубарев. — СПб.: Энергоатомиздат, 2000.

2. *Барщевский Е. Г.* Идентификация и оптимизация судовых автоматизированных систем методами планирования эксперимента / Е. Г. Барщевский, Ю. Я. Зубарев. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

УДК 681.3.07:656.6:005

А. П. Нырков,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Нырков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК

MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR RISKS MINIMIZING OF MULTIMODAL TRANSPORTATIONS

В статье предложены модели, алгоритмы и коды в Maple минимизации рисков мультимодальных перевозок.

The article tells about the models, algorithms and Maple codes for risks minimizing of multimodal transportations.

Ключевые слова: модель, алгоритм, риски, мультимодальные перевозки.
Key words: model, algorithm, risks, multimodal transport.

НА транспорте в целом и на водном транспорте в частности практически все технологические процессы (эксплуатация транспортных объектов, перевозка и перегрузка грузов, перевозка пассажиров и др.) подвержены влиянию случайных факторов [1; 2, с. 283–286; 3; 4]. Итогом их воздействия могут быть потери материальных ресурсов, и порой существенные. Для минимизации потерь можно воспользоваться методами теории риска.

В ISO Guide 73–2009 риск определяется как «следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей» [5, с. 5]. Под «следствием влияния» следует понимать величину отклонения от ожидаемого результата, то есть ухудшение некоторого критериального показателя.

В качестве критериального показателя может выступать любой показатель качества, например доход или прибыль деятельности транспортного предприятия (судоходная компания, транспортно-логистический комплекс, порт). Будем считать, что на критериальный показатель оказывают влияние различные факторы риска, понижающие этот показатель. Факторы риска можно подразделить на несколько категорий: риски для различных видов транспорта и риски перевалки грузов. Внутри этих категорий риски также подразделяются: на происшествия на данном виде транспорта под воздействием случайных факторов (погода, землетрясения и др.), из-за человеческого фактора, влияние сезонности и т. д.

При реализации рисковых ситуаций могут возникнуть потери (снижение) показателя, равные Z. Исходя из стохастической природы рисков, потери целевого показателя, являющиеся функцией от случайных величин рисков: $Z = f(Z_1, \ldots, Z_n)$, также носят вероятностный характер. $Z_1, \ldots, Z_n$ — возможные средние потери критериального показателя от воздействия различных факторов риска. Чаще всего функциональная зависимость критериального показателя от факторов риска имеет вид линейной функции: $Z = Z_1 + \ldots + Z_n$.

В качестве модели оценки Z можно использовать ее функцию распределения вероятностей. Для этого необходимо знание интегральных функций распределения вероятностей факторов риска. Если предположить, что случайная величина Z имеет конечное математическое ожидание, равное μ, то можно с достоверной вероятностью γ считать, что возможные потери критериального показателя попадут в интервал $(\mu - \delta; \mu + \delta)$. Неизвестная величина δ находится как корень уравнения: $F(\mu + \delta) - \mathrm{F}(\mu - \delta) = \gamma$, где $F(x)$ интегральная функция распределения вероятностей показателя Z.

Вычисление функции распределения вероятностей возможных потерь критериального показателя $F(x)$ обычно связано с большими сложностями, так как для этого требуется знание функций распределения вероятностей факторов риска, определение которых либо затруднено, либо априори невозможно. Дополнительную сложность добавляет и то, что одни факторы риска представляют собой непрерывные случайные величины, а другие — дискретные. Вместо нахождения функции распределения вероятностей возможных потерь критериального показателя $F(x)$ можно попытаться определить математическое ожидание случайной величины Z.

Количественная оценка влияния i-го фактора риска Z_i исчисляется некоторой средней величиной потерь критериального показателя при реализации этого риска: $Z_i = p_i\, \Delta Z_i$, где p_i — вероятность наступления i-го фактора риска, а ΔZ_i — абсолютные потери при его реализации.

Если i-й риск может проявляться в зависимости от наступления одного из m_i несовместных событий A_{ij} с вероятностью p_{ij}, то количественная оценка уровня риска определяется из соотношения

$$Z_i = \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \times \Delta Z_{ij}, \tag{1}$$

где $p_{ij} = \mathrm{P}(\{Z_i = \Delta Z_{ij}\} / A_{ij})$ — вероятность того, что при условии наступления события A_{ij} произойдет снижение критериального показателя на ΔZ_{ij}.

В общем случае оценка снижения критериального показателя может быть получена как сумма средних возможных потерь из-за проявления каждого из n рисков:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} Z_i = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \times \Delta Z_{ij}. \tag{2}$$

Одновременное проявление всех возможных рисковых ситуаций является маловероятным событием. При этом на практике наступление той или иной рисковой ситуации может повлечь за собой другую рисковую ситуацию. В результате может возникнуть цепочка взаимосвязанных рисков. Определить среди них ту, которая может повлечь за собой максимально возможную величину потерь критериального показателя, можно с помощью построения ациклического ориентированного графа рисковых ситуаций.

Пусть $G = (V, E)$ — ациклический ориентированный граф, где $V = \{1, 2, \ldots, n\}$ — множество вершин графа, $E = \{(i, j)\}$ — множество дуг. Дуга (i, j), идущая из вершины i в вершину j, входит в граф G, если рисковая ситуация j может последовать за рисковой ситуацией i. Длина этой дуги или ее весовой коэффициент Z_i соответствует возможной величине потерь критериального показателя при реализации рисковой ситуации i. В ациклическом графе можно перенумеровать вершины таким образом, чтобы для всех дуг (i, j) выполнялось неравенство $i > j$. Вершине с номером 1 ставится в соответствие критериальный показатель, остальным вершинам — возможные рисковые ситуации. Дополнительно для упрощения математической модели поиска критической цепочки рисковых ситуаций введем еще одну фиктивную вершину n. Добавим дуги, исходящие из нее в вершины графа рисковых ситуаций, в которые не входит ни одна дуга. Этим дугам присвоим нулевые весовые коэффициенты.

Для нахождения наиболее критической цепочки рисковых ситуаций будем, следуя [6], представлять произвольную цепочку вектором

$$\mathbf{X} = \left\{ x_{ij} \mid (i, j) \in G \right\}. \tag{3}$$

При этом $x_{ij} = 1$, если дуга (i, j) принадлежит рассматриваемой цепочке, иначе $x_{ij} = 0$. Вектор $\mathbf{X} = \left\{ x_{ij} \mid (i, j) \in G \right\}$ описывает цепочку, проходящую через вершины графа G, если выполняются следующие условия:

$$\sum_{(i,j)\in G} x_{ij} - \sum_{(j,i)\in G} x_{ji} = 0, \text{ если } i \in \{2, 3, ..., n-1\}; \tag{4}$$

$$\sum_{(1,j)\in G} x_{1j} - \sum_{(j,1)\in G} x_{j1} = -1; \tag{5}$$

$$\sum_{(n,j)\in G} x_{nj} - \sum_{(j,n)\in G} x_{jn} = 1. \tag{6}$$

Возможную величину потерь критериального показателя для цепочки рисковых ситуаций $\mathbf{X}$ находим из соотношения

$$Z(X) = \sum_{(i,j)\in G} x_{ij} Z_{ij}, \tag{7}$$

где $Z_{ij} = Z_i$, если дуга (i, j) входит в граф G, иначе $Z_{ij} = 0$.

Для нахождения критической цепочки рисковых ситуаций предлагается следующая модель:

$$\begin{cases} \max\left\{Z(\mathbf{X})\right\}, \\ \sum\limits_{(1,j)\in G} x_{1j} - \sum\limits_{(j,1)\in G} x_{j1} = -1, \\ \sum\limits_{(i,j)\in G} x_{ij} - \sum\limits_{(j,i)\in G} x_{ji} = 0, \ i \in \left\{2, 3, ..., n-1\right\}, \\ \sum\limits_{(n,j)\in G} x_{nj} - \sum\limits_{(j,n)\in G} x_{jn} = 1, \\ x_{ij} \in \left\{0, 1\right\}, \ \forall (i, j) \in G. \end{cases} \tag{8}$$

Для больших размерностей матрицы смежности графа G существуют быстрые, эффективные алгоритмы нахождения цепочек с максимальной длиной. Используя условие неотрицательности весовых коэффициентов графа G, можно использовать «жадный» алгоритм, подобный, например, алгоритму Дейкстры [7]. Правда, с помощью этого алгоритма находят кратчайший путь из одной вершины в другую. Но, поменяв у всех весов знак на противоположный и учитывая ацикличность графа *G*, можно построить алгоритм нахождения критической цепочки, временна́я сложность выполнения которого линейна по сравнению с суммарным количеством вершин и дуг.

Количество возможных рисковых ситуаций на практике бывает не очень большим, поэтому размерность матрицы смежности графа *G* позволяет применить к нему алгоритм полного перебора всех возможных цепочек. Используем для этого математический пакет аналитических вычислений Maple, в который входит программный пакет GraphTheory с различными средствами представления графов и обработки их структур. Кроме того, Maple включает в себя достаточно развитую среду программирования, позволяющую дополнительно создавать средства алгоритмизации на графах [8, с. 52–54; 9, с. 54–55].

Как уже отмечалось выше, для ациклического ориентированного графа можно получить такую линейно упорядоченную последовательность вершин, что начальная вершина любой дуги данного графа стоит в ней раньше конечной вершины дуги. Это означает, что можно все вершины такого графа представить в виде $v_1, v_2, ..., v_n$ и вершина v_i предшествует вершине v_j $(i < j)$, если в графе есть дуга (v_i, v_j). Это позволяет существенно снизить временну́ю сложность алгоритма нахождения критической цепочки рисковых ситуаций. Более того, можно реализовать алгоритм, который находит не одну, а все критические цепочки.

Код алгоритма, реализованный в пакете Maple, частично представлен ниже.

```
> restart:with(GraphTheory):
>     # создает список смежных вершин из матрицы смежности
  AdjRep:= proc(am)
  end proc:
>    # вычисляет веса цепочки
  weightS:=proc(p,wm)
  end proc:
>    # создает все возможные цепочки из вершины v
  InDepth:=proc(v) # номер вершины для обработки
    local i,j,k; global adjG,AllS,p;
  end proc:
>    # находит все возможные критические цепочки
  AllCriticalR:=proc(G)    # G - графовая структура
  local i,j,n,vSort,w,am,wm,wNom;
  global PrintV,AdjRep,InDepth,weightS,adjG,AllS,p;
  wm:=WeightMatrix(G);
  am:=AdjacencyMatrix(G);
  adjG:=AdjRep(am);
  vSort:=TopologicSort(G);
  AllS:=[];
  p:=[];
  InDepth(vSort[1]);
  w:=weightS(AllS[1],wm):
  wNom:=[1]:
  for i from 2 to nops(AllS) do
    n:=weightS(AllS[i],wm):
    if n>w then
      wNom:=[i]:
      w:=n:
    elif n=w then
      wNom:=[op(wNom),i]:
    end if
```

```
  end do:
  for i from 1 to nops(wNom) do
    PrintV(AllS[wNom[i]],w)
  end do:
end proc:

> adjG:=[]:
  AllS:=[]:
  p:=[]:
  AllCriticalR(G);
```

Модель (8) является в определенном смысле детерминированной, так как в ней используются средние ожидания потерь критериального показателя. В реальных условиях эти потери могут принимать случайные значения из некоторого интервала или дискретного диапазона. Для учета стохастичности потерь критериального показателя будем рассматривать Z_{ij} в (7) как случайную величину, имеющую плотность распределения вероятностей для непрерывной случайной величины $p_{Z_{ij}}(z)$ либо подчиненную закону распределения вероятностей дискретной случайной величины $\left\{Z_{ij}^k -> p_{ij}^k = P\left(Z_{ij} = Z_{ij}^k\right)\right\}$, $k = 1, ..., n_i$. К ограничениям модели (8) добавим еще одно ограничение

$$\mathbf{P}\left\{\sum_{(i,j)\in G} x_{ij} Z_{ij} \geq Z_{KP}\right\} \geq 1 - \alpha, \tag{9}$$

где α — заданный уровень значимости.

Стохастическая модель нахождения критической цепочки строится в виде

$$\begin{cases} \max\left\{Z_{KP}\right\}, \\ \mathbf{P}\left\{\sum\limits_{(i,j)\in G} x_{ij} Z_{ij} \geq Z_{KP}\right\} \geq 1 - \alpha \\ \sum\limits_{(1,j)\in G} x_{1j} - \sum\limits_{(j,1)\in G} x_{j1} = -1, \\ \sum\limits_{(i,j)\in G} x_{ij} - \sum\limits_{(j,i)\in G} x_{ji} = 0,\ i \in \left\{2, 3, ..., n-1\right\}, \\ \sum\limits_{(n,j)\in G} x_{nj} - \sum\limits_{(j,n)\in G} x_{jn} = 1, \\ x_{ij} \in \{0,1\},\ \forall\left(i, j\right) \in G. \end{cases} \tag{10}$$

В модели (10) при условии непрерывности случайной величины длины цепочки максимум достигается для соотношения равенства в ограничении (9).

Для анализа и управления рисковыми ситуациями, кроме выявления критических цепочек рисковых ситуаций, можно предложить стохастическую модель определения цепочек, при реализации которых вероятность того, что потери критериального показателя будут значительными, превысит заданный уровень значимости α. Такая модель может быть построена для критерия

$$\max \mathbf{P}\left\{\sum_{(i,j)\in G} x_{ij} Z_{ij} \geq Z_{KP}\right\} \tag{11}$$

с ограничениями

$$\begin{cases} \sum\limits_{(1,j)\in G} x_{1j} - \sum\limits_{(j,1)\in G} x_{j1} = -1, \\ \sum\limits_{(i,j)\in G} x_{ij} - \sum\limits_{(j,i)\in G} x_{ji} = 0, \ i \in \{2, 3, ..., n-1\}, \\ \sum\limits_{(n,j)\in G} x_{nj} - \sum\limits_{(j,n)\in G} x_{jn} = 1, \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \ \forall (i, j) \in G. \end{cases} \quad (12)$$

Для моделей (10)–(12) в качестве основы алгоритмов нахождения соответствующих цепочек можно использовать модификации «метода случайного поиска» [3; 10; 11, с. 98–101; 12, с. 43–53].

Укрупненный алгоритм для модели (10) выглядит следующим образом.

1. Присвоить k значение 1.

2. Сгенерировать рисковую цепочку $\{x_{ij}^k\}$.

3. Увеличить k на 1. Повторить п. 2, если k не превосходит N.

4. Положить M равным целой части $(1 - \alpha)\ N$.

5. Максимальное значение Z_{KP} положить равным длине M-й наибольшей цепочки, удовлетворяя ограничение (9).

Укрупненный алгоритм для модели (11), (12) выглядит следующим образом.

1. Для заданного количества серий генераций последовательностей рисковых ситуаций N задать максимальное значение Z_{KP}.

2. Задать M — количество сгенерированных последовательностей в серии. Эта величина в 5 раз должна превышать количество дуг в графе G. Положить k равным 1.

3. Сгенерировать серию из M рисковых цепочек $\{\{x_{ij}^1\},\ldots,\{x_{ij}^M\}\}$.

4. В качестве цепочки $\{x_{ij}^k\}$ взять ту, длина которой с наибольшей вероятностью превышает максимальное значение Z_{KP}.

5. Увеличить k на 1. Повторить п. 3 и 4, если k не превосходит N.

6. Из полученных в п. 4 цепочек выбрать ту, которая имеет максимальную частоту повторения.

Модели, алгоритмы и программное обеспечение для них при несложных модификациях могут быть успешно использованы и в других отраслях. Например, приведенные здесь модели и алгоритмы были использованы для анализа, оценки и управления рисками образовательной деятельности в высших учебных заведениях (см. [13, с. 35–41]).

Список литературы

1. *Вихров Н. М.* Модели технологических процессов на транспорте / Н. М. Вихров, А. П. Нырков. — СПб.: Судостроение, 2002. — 422 с.

2. *Нырков А. П.* Стохастическая модель технологического процесса в транспортном узле / А. П. Нырков // Информационные технологии на транспорте: сб. науч. тр.— СПб.: Политехника, 2003.

3. *Нырков А. П.* Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. … д-ра техн. наук / А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 304 с.

4. *Истомин Е. П.* Методы теории вероятностей и математической статистики в моделировании транспортных процессов / Е. П. Истомин [и др.]. — СПб.: СПГУВК, 1999. — 168 с.

5. Руководство ИСО 73–2009. Менеджмент риска. Термины и определения: ГОСТ Р 51897–2011. — Введ. 01.12.2012. — М.: Стандартинформ, 2012. — 16 с.

6. *Лю Б.* Теория и практика неопределенного программирования: пер. с англ. / Б. Лю. — М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2005. — 416 с.

7. *Кормен Т.* Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. — М.: МЦНПО, 2000. — 960 с.

8. *Нырков А. А.* Опыт использования пакета Maple как средства компьютерной поддержки при изучении математических дисциплин / А. А. Нырков, М. Ю. Ястребов // Математика в вузе: тр. XXII Междунар. науч.-метод. конф. — СПб.: ПГУПС, 2010.

9. *Нырков А. А.* Опыт использования систем компьютерной математики при изучении математических дисциплин / А. А. Нырков, М. Ю. Ястребов // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XI Междунар. науч. конф., посвященной 70-летию профессора В. П. Дьяконова. — Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2010.

10. *Нырков А. А.* Имитационное моделирование транспортных процессов / А. А. Нырков, А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 112 с.

11. *Нырков А. П.* Математическая модель резервирующей системы / А. П. Нырков, Т. В. Дмитриева // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2011. — Вып. 2 (10).

12. *Нырков А. П.* Алгоритмы автоматизированного управления технологическими процессами мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, [и др.] // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2010. — Вып. 4 (8).

13. *Антохина Ю. А.* Риски образовательной деятельности в современных рыночных условиях / Ю. А. Антохина, А. П. Нырков, А. Г. Варжапетян // Экономика и управление. — 2012. — № 8.

УДК 004.031,007.51

В. Н. Ежгуров,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ

SOFTWARE OF AUTOMATION OF MULTIMODAL TRANSPORT IN THE FRAMEWORK OF THE INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDORS

В статье рассматриваются подходы к построению алгоритмического и программного обеспечения автоматизации мультимодальных грузоперевозок в рамках международных транспортных коридоров.

The article considers approaches to the construction of algorithms and software of automation of multimodal cargo transportation in the framework of international transport corridors.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, международные транспортные коридоры, автоматизация перевозок, многомерный анализ данных.

Key words: multi-modal transportation, international transport corridors, traffic automation, multidimensional data analysis.