

УДК 5:519.876.3.

А.Б. Логов, А.Р.Крумгольц

МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Интерес, проявляемый к исследованию и количественному оцениванию **риска**, связан с рядом форм управляющих воздействий на реальные, функционирующие промышленные объекты (системы). Однако в большинстве рассмотренных авторами публикаций подробно обсуждается оценивание риска проектов, основанное на прецедентах и заключениях экспертов и не представляющее какой-либо ценности для задач моделирования.

Существенно ближе к развивающейся идеи оценивание страхового риска, но и в этих задачах преобладают статистические подходы (те же прецеденты).

Популярными стали плохо formalизованные термины «конкурентоспособность» и «инвестиционная привлекательность», в основе которых лежат субъективные определения. Но по отношению к этим важным свойствам не развиты правила и методы оценивания **риска**. Более того, для вычисления подобных интегральных характеристик через показатели различной природы и размерности отдельные авторы рекомендуют либо привлекать «мифических» компетентных экспертов, либо использовать устаревшие весовые коэффициенты, приведенные еще в методиках Госплана СССР.

Трудность принятия решений усугубляется, если рассматривать наиболее интересные для анализа системы как уникальные объекты [1], осознавая некорректность прецедентов. В теории диагностики так выделены объекты, для которых невозможно статистическим путем получить надежные эмпирические эталоны видов состояния.

С другой стороны, именно для подобных обстоятельств в работах ИУУ СО РАН развивается энтропийный метод анализа [2,3], отличительными чертами которого являются:

1) уникальность объектов; алгоритмы метода предложены не из-за пренебрежения априорной информацией, но могут быть реализованы при ее недостаточности или отсутствии;

2) пригодность для исследования неоднородных систем, содержащих элементы разного типа (шахты, разрезы, обогатительные фабрики, транспортные подразделения и т.д.) и/или вида состояния;

3) наличие функциональных характеристик различной природы и размерности;

4) неупорядоченность списка (перечня) элементов систем или невозможность выделить какой-либо показатель в качестве аргумента.

Опыт применения метода дал положительные результаты, однако в анализе используется функциональные характеристики и трудно обосновать

включение в их число показателей внешней среды.

Таким образом, обсуждается идея введения в правила принятия решения поправок на условия функционирования промышленных объектов. При этом акцент делается на алгоритмические возможности моделей энтропийного типа с необходимым для реализации метода разделением на аддитивные (например, валовые) и неаддитивные (прежде всего, относительные) показатели. Для удобства изложения предлагаются следующие определения:

- **удельные веса**, которые оцениваются через модель взвешенных долей [2]

$$V_1(i/j) = -w(i/j) \log_2 w(i/j),$$

где

$$w(i/j) = \frac{W(i/j)}{\sum_{i=1}^A W(i/j)}$$

- **доля** элемента i ($i = \overline{1, A}$) по показателю $W(j)$ ($j = \overline{1, B}$), и имеют вид:

$$\Omega(i/j) = \frac{V_1(i/j)}{\sum_{i=1}^A V_1(i/j)};$$

- **цены**

$$\varphi(i/k) = \frac{\log_2 R(i/k)}{\log_2 \prod_{i=1}^A R(i/k)},$$

основанные в рамках данной статьи на относительных (качественных) показателях внешней среды $R(i/k)$ и поэтому построенные на моделях

$$V_2(i/k) = \log_2 R(i/k), k = \overline{1, C}$$

Определение **рисков** как измененных **удельных весов** предлагается дать в следующей форме:

$$\Omega(i/j; \varphi) = \frac{\Omega(i/j)\varphi(i/k)}{\sum_{i=1}^A \Omega(i/j)\varphi(i/k)} =$$

$$\frac{\log_2 w(i/j)^{-w(i/j)} \cdot \log_2 R(i)}{\sum_{i=1}^A [\log_2 w(i/j)^{-w(i/j)} \cdot \log_2 R(i)]}$$

Здесь индекс (.../...; φ) выделяет условия определения.

Главная идея модели заключается в том, что

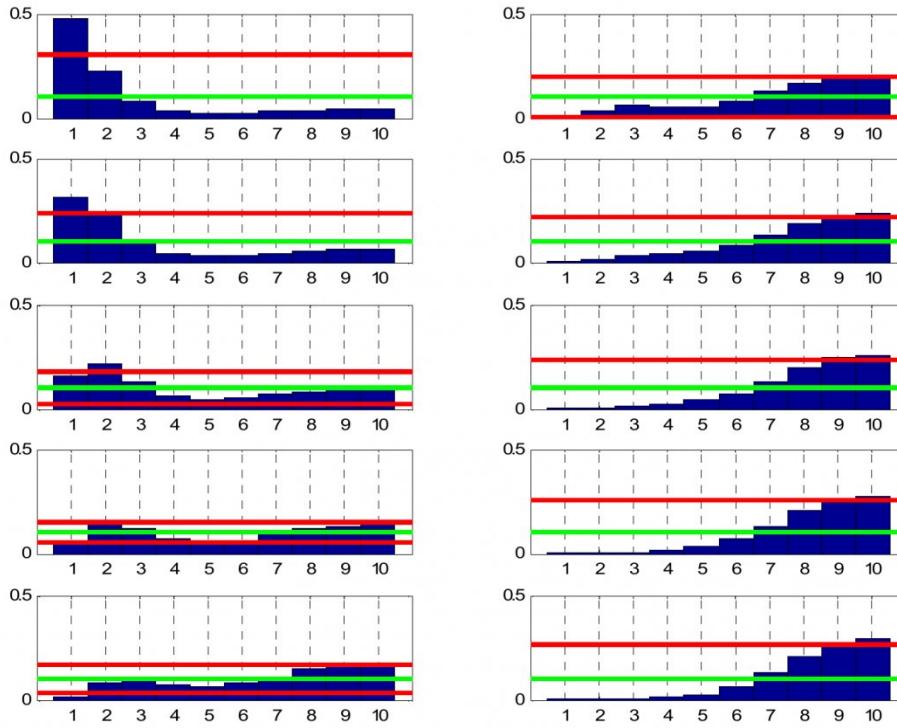


Рис.1. Изменчивость оценок рисков при обобщении (бимодальном) цен

недостаточную практическую надежность k -ой цены можно повысить, используя **обобщение по группе** $C_1 \leq k \leq C_2$

$$H_\varphi(i/C_1; C_2) = \sum \frac{\log_2 R(i/k) - \bar{M}[\log_2 R(k)]}{\delta_1(k)}.$$

Тогда получаем новое определение цен

$$\varphi(i/C_1, C_2) = \frac{\sum_{k=C_1}^{C_2} \log_2 [\delta_2(k) R(i/k)]}{\sum_{i=1}^A \sum_{k=C_1}^{C_2} \log_2 [\delta_2(k) R(i/k)]},$$

где

$$\delta_1(k) = \sigma[\log_2 R(k)] = \sqrt{\frac{1}{A-1} \sum_{i=1}^A \log_2^2 [\delta_2(k) R(i/k)]};$$

$$\delta_2(k) = \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A}.$$

В результате оценивание рисков производится по модели:

$$\Omega(i/j; k; \varphi(C_1, C_2)) = \frac{T(i/j)}{\sum_{i=1}^A T(i/j)},$$

где

$$T(i/j) = \beta(i) \cdot \log_2 w(i/j)^{-w(i/j)} \times \sum_{k=C_1}^{C_2} \log_2 [\delta_2(k) \cdot R(i/k)];$$

$$\beta(i) = \log_2^{-1} \prod_{i=1}^A w(i/j)^{-w(i/j)}.$$

Кроме того, при наличии позитивных ($C_1 \leq k \leq C_2$) и негативных ($C_3 \leq k \leq C_4$) показателей действенным приемом является **комбинация** показателей или групп показателей

$$H(i/k(C_{1,2} - C_{3,4})) = \sum_{k=C_1}^{C_2} \frac{\log_2 R(i/k) - \bar{M}[\log_2 R(k)]}{\delta_1(k)} - \sum_{k=C_3}^{C_4} \frac{\log_2 R(i/k) - \bar{M}[\log_2 R(k)]}{\delta_1(k)}.$$

Определение цен несколько усложняется, но для алгоритма это не имеет решающего значения: $\varphi(i/C_{1,2} - C_{3,4}) =$

$$= \frac{\sum_{k=C_1}^{C_2} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right]}{\sum_{i=1}^A \sum_{k=C_1}^{C_2} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right]} \times$$

$$\times \frac{\sum_{i=1}^A \sum_{k=C_3}^{C_4} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right]}{\sum_{k=C_1}^{C_2} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right]}$$

Соответствующим образом оцениваются **риски по комбинациям**

$$\begin{aligned} \Xi(i/j; k; \varphi(C_{1,2} - C_{3,4})) &= \\ &= \Omega(i/j) \cdot \varphi(i/C_{1,2} - C_{3,4}) = \\ &= \varepsilon(i) \cdot \log_2 w(i/j)^{-w(i/j)} \times \\ &\times \sum_{k=C_1}^{C_2} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right] \times \\ &\times \sum_{i=1}^A \sum_{k=C_1}^{C_2} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right] \times \\ &\times \sum_{i=1}^A \sum_{k=C_3}^{C_4} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right], \\ &\times \sum_{k=C_3}^{C_4} \delta_2(k) \cdot \log_2 \left[R(i/k) \prod_{i=1}^A R(i/k)^{-1/A} \right] \end{aligned}$$

где

$$\varepsilon(i) = \log_2^{-1} \prod_{j=1}^B w(i/j)^{-w(i/j)}.$$

Для обоснования полезности предложенных моделей был проведен вычислительный эксперимент, имеющий смысл тестовой задачи. Кратко он

может быть представлен следующими условиями:

- модели распределения по элементам i показателей типа $W(i/j)$ и $R(i/j)$ выбираются так, чтобы при изменении параметров j и k различие характеризовалось инвариантным, структурным параметром [1]; таким образом, решается вопрос о значимости моделируемых эффектов (общее условие);

- с другой стороны модели должны быть представительными – описывать все многообразие возможных распределений (общее условие);

- модели показателей $W(i/j)$ устанавливают иерархию $W(i/j) < W(i+1/j)$ распределения в системе (частное условие данной статьи);

- модели показателей $R(i/j)$ должны последовательно смещать максимумы **цен** на другие элементы; для упрощения алгоритма – на элементы $i = k$ (частное условие статьи).

Таким образом, доказана целесообразность и полезность моделирования **рисков**, приводящего к нетривиальным результатам.

Обоснованию выбранных моделей энтропийного типа служит возможность проведения обобщений **цен**, которые рассматриваются как прием повышения практической достоверности анализа и могут привести к распределениям особой структуры. Определение **рисков** при подобном образом изменяющихся условиях показывает, в какой мере опасность функционирования перераспределяется между элементами системы (рис. 1).

Собственно задача моделирования достаточно произвольно связывает «позитивные» и «негатив-

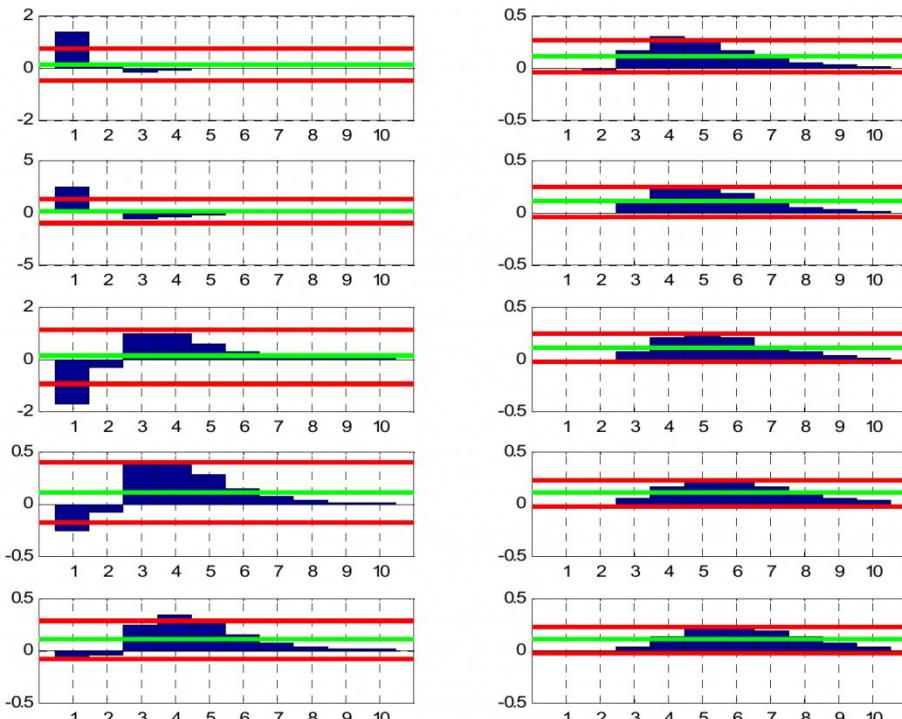


Рис. 2. Формирование **рисков** при комбинации предельно близких распределений «позитивных» и «негативных» **цен**

ные» факторы, поэтому без дополнительных условий отрицательное значение оценки **риска** можно (опять же в рамках данной статьи) как некоторый запас «функциональной надежности». Множество комбинаций моделей **цен** позволяет проследить, как меняется этот показатель в отдельных элементах системы (рис. 2).

Здесь моделирование указывает на значительную неустойчивость состояния, прежде всего, элемент $i=1$. Кроме того, проявляются особенности поведения элемента $i=4$.

Разработанный метод оценивания **рисков** реализован в программе управления состоянием тепловых сетей г. Кемерово. В общей части основные характеристики системы в соответствии с гипотезой накопления повреждений приведены к следующей схеме влияния факторов:

- **удельные веса** каждой группы труб и соответствующая вероятность отказов определяются в пропорции с их длиной;
- **цены** каждой группы труб определяются по принципу накопления повреждений и зависят пропорционально от: 1) $\varphi(i)$ срока службы по $i = 1, \dots, 7$ при наземной прокладке и $i = 8, \dots, 14$ при канальном способе; 2) $\gamma(j)$ диаметра трубы $j = 1, \dots, 12$.

Итоговая картина распределения **рисков** (рис. 3) отразила влияние иерархической структуры системы и хронологии ее сооружения.

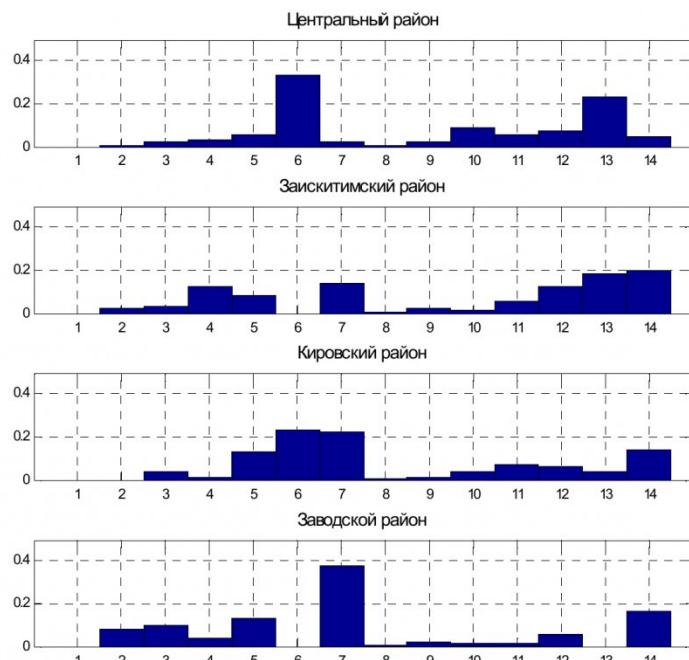


Рис. 3. Распределение рисков с учетом указанных факторов

Для детализации анализа и ранжирования степени влияния факторов выделены в отдельности подсистемы наземной и канальной прокладки.

Итоговым результатом подготовительной части анализа явилось определение сложившихся и характерных для городской системы параметров – **цен** срока службы $\varphi(i)$ и **цен** диаметра (типо-размера) $\gamma(i)$.

Извлеченная из общей сети подсистема участков с повышенной аварийностью представлена на рис. 4 распределением **удельных весов**, пропор-

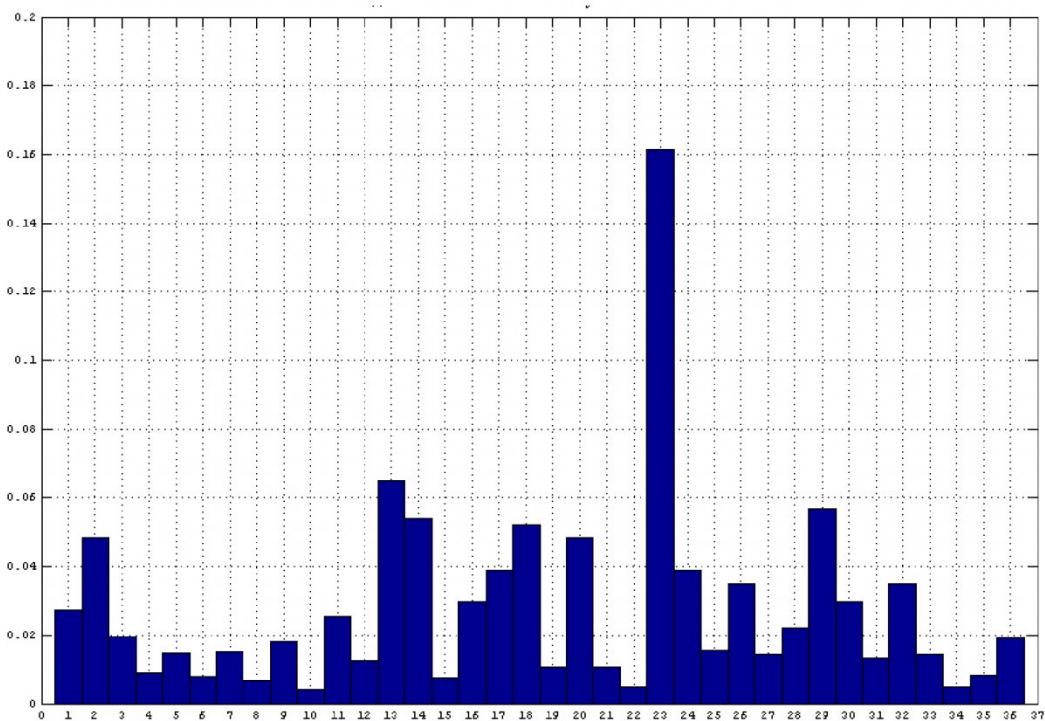


Рис. 4. Распределение удельных весов участков повышенной аварийности

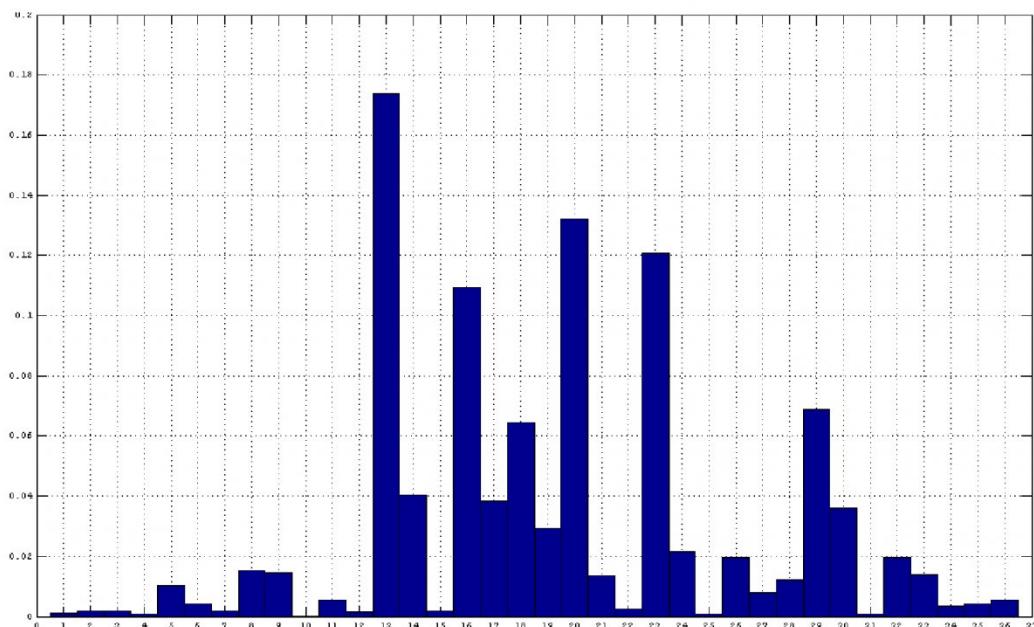


Рис. 5. Итоговое распределение **рисков** с учетом срока службы, диаметра трубопроводов и социальной роли участков

циональных длинам участков.

Оценка **рисков** через срок службы и типо-размер трубопроводов привела к картине с возросшей дифференциацией участков – коэффициент вариации распределения возрастает на $\approx 24\%$.

Следующим этапом введена поправка на социальную роль каждого участка трубопровода, соответствующие **цены** определены в пропорции с площадью зданий и сооружений, которые должны пострадать при аварии на участке. С учетом этого построено распределение **рисков** (рис. 5), которое радикально уменьшает неопределенность выбора опасных участков (коэффициент вариации возрастает на $\approx 49,3\%$) и облегчает принятие решений при управлении состоянием тепловой сети.

Важность полученной оценки характеризуется, в частности, тем, что на 4 участка (№№ 13, 20, 23, 16) приходится около 53,6% суммарного **рис-**

ка эксплуатации тепловых сетей города.

Целесообразно отметить, что оценка **риска** некоторых элементов (в частности, $\Omega(i=10) \approx 0.00026$; $\Omega(i=25) \approx 0.00079$ и т.д.) вплотную приводит к эффекту изменения знака, обнаруженному в тестовой задаче. Если произвести далее **взвешивание** по некоторой комбинации (разности факторов, например – затраты и тарифы), то эти участки будут давать уменьшение **риска**. Отсюда вытекает еще одно обоснование проведенного тестирования.

Пример ярко доказывает новизну и отличие от энтропийного метода – поправка на социальную роль системы выходит за рамки анализа ее функциональных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Логов А.Б., Замараев Р.Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 228 с., ил.
- Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А. Анализ функционального состояния промышленных объектов в фазовом пространстве. Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово: 2004. – 168 с.
- Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А. Анализ состояния уникальных объектов (развитие и тестирование). Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово: 2004. – 107 с.

□ Авторы статьи:

Логов
Александр Борисович
- докт.техн.наук, проф., гл. научн.
сотр.Института угля и углехимии СО РАН

Крумгольц
Александр Рудольфович
- соискатель Института угля
и углехимии СО РАН