

УДК 519.254

# ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РИСКОМ И ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ В СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

**В. В. Алексеев,**  
программный разработчик  
**Е. Д. Соложенцев,**  
доктор техн. наук, профессор  
Институт проблем машиноведения РАН

Дается краткое описание логико-вероятностного подхода к управлению риском и эффективностью в структурно-сложных системах. Приводятся основные понятия, положения и принципы. Применение такого подхода рассмотрено на примере технической системы.

**Ключевые слова** — логическая модель, вероятностная модель, управление риском, управление эффективностью, структурно-сложная система, логико-вероятностный подход.

## Введение

В настоящее время достаточно много внимания уделяется проблеме управления риском в технических, экономических, социальных и других системах. Однако часто риск в системе нельзя рассматривать в отрыве от эффективности ее функционирования. В самом общем случае эффективность — это уровень соответствия результатов какой-либо деятельности поставленным задачам, а риск — это возможность неуспеха этой деятельности. При этом неуспех может сопровождаться и другими неприятными последствиями: авариями, человеческими жертвами или просто материальными убытками.

Чем больше эффективность, тем больше риск. В то же время если стараться максимально снизить риск, эффективность может оказаться на неприемлемом уровне. Именно поэтому в процессе управления всегда необходимо учитывать оба эти параметра. Примеров существует достаточно много. При анализе деятельности предприятия эффективностью является приносимая прибыль, а риском — возможность понести убытки. При этом и на тот, и на другой параметр влияет множество взаимосвязанных факторов, таких как действия руководящего состава, действия конкурентов, рыночная конъюнктура и т. д. В инвестиционной деятельности рассматривается портфель, состоящий из акти-

вов, имеющих разные параметры, чья стоимость изменяется случайным образом под действием множества причин. Эффективностью и риском также являются прибыль и возможность убытков.

Приведенные системы характеризуются большим количеством элементов и связей, случайным характером изменения параметров. Для управления риском и эффективностью в таких системах, которые будем называть структурно-сложными, требуется адекватный математический аппарат. Предлагается рассматривать проблему на основе логико-вероятностного подхода (ЛВ-подхода) [1, 2] с использованием статистических данных мониторинга функционирования системы. За счет применения логико-вероятностного исчисления [2] расширяются возможности анализа параметров, влияющих на функционирование системы. Разные приложения требуют детальной разработки и имеют свою специфику. До настоящего времени для управления риском и эффективностью ЛВ-подход применялся главным образом в социально-экономических задачах. Его использование в проблеме управления риском портфеля ценных бумаг рассмотрено в работе [3]. Данная статья демонстрирует возможности применять ЛВ-подход для управления риском и эффективностью в технических системах на примере газоперекачивающего агрегата (ГПА).

## Основы ЛВ-подхода к управлению риском и эффективностью

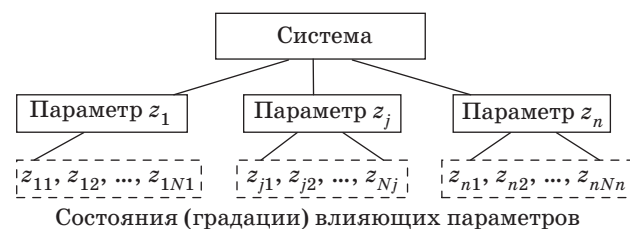
На поведение системы, ее эффективность и риск влияет множество параметров, называемых *влияющими*. Метод базируется на использовании статистических данных мониторинга функционирования системы. Представляются статистические данные в табличном виде (таблица). Каждой строке таблицы соответствует состояние системы, которое характеризуется значениями влияющих параметров и величиной эффективности. В таблице  $Z_{jt}$  — значение параметра  $j$  в состоянии  $t$  системы,  $Y_t$  — значение параметра эффективности в состоянии  $t$ . Влияющие параметры могут иметь разную природу, изменяться как непрерывно, так и иметь естественную дискретизацию.

Для использования ЛВ-подхода необходимо, чтобы все параметры имели конечные множества значений. Поэтому непрерывные параметры разбиваются на интервалы. После такого преобразования каждый из рассматриваемых параметров будет иметь набор состояний (или градаций)  $r = 1, 2, \dots, N_j$ . Эти состояния рассматриваются как логические переменные и обозначаются маленькими буквами. Переменная  $z_{jr}$  принимает значение 1, если параметр  $j$  принимает состояние  $r$ . В самом общем виде систему можно представить на рис. 1.

Как и влияющие параметры, система имеет конечное множество состояний:

### ■ Значения влияющих параметров и параметра эффективности

Номер состояния системы	Параметр 1 $Z_1$	...	Параметр $j$ $Z_j$	...	Параметр $n$ $Z_n$	Эффективность $Y$
1	$Z_{11}$	...	$Z_{j1}$	...	$Z_{n1}$	$Y_1$
...	...	...	...	...	...	...
$t$	$Z_{1t}$	...	$Z_{jt}$	...	$Z_{nt}$	$Y_t$
...	...	...	...	...	...	...
$T$	$Z_{1T}$	...	$Z_{jT}$	...	$Z_{nT}$	$Y_T$



■ Рис. 1. Структурная модель системы

$$N = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_j \cdot \dots \cdot N_n, \quad (1)$$

где  $N_j$  — число состояний параметра  $j$ .

Такое рассмотрение позволяет решать задачи двух разных типов с разными логическими функциями. В обоих случаях риск определяется как вероятность перехода эффективности системы за пороговое значение.

1. Оценка вероятности того, что система примет то или иное состояние. В этом случае логическая функция имеет вид

$$y = z_1 \wedge z_2 \wedge \dots \wedge z_j \wedge \dots \wedge z_n. \quad (2)$$

Риск оценивается как интегральная характеристика множества состояний. Здесь предполагается, что для каждого состояния системы можно вычислить эффективность, т. е. имеется функциональная зависимость

$$Y_i = F(y_i) = F(z_{1r_1}, z_{2r_2}, \dots, z_{jr_j}, \dots, z_{nr_n}). \quad (3)$$

Этот тип задач решался при моделировании и оценке риска в инвестициях [3].

2. Оценка вероятности вкладов влияющих параметров в риск и эффективность. Здесь логическая функция непосредственно является сценарием неуспеха и формулируется следующим образом: «неуспех происходит из-за любого одного события, или двух, ..., или всех событий»:

$$y_f = z_1 \vee z_2 \vee \dots \vee z_j \vee \dots \vee z_n. \quad (4)$$

Задача сводится к определению вероятностей инициирующих событий. Этот подход имеет смысл, когда эффективность задается только по статистическим данным и ее невозможно вычислить по состояниям влияющих параметров. В этом случае основное внимание уделяется анализу влияния отдельных параметров и их градаций на риск и эффективность системы в целом. Данный тип задач рассмотрим на примере ГПА.

## Анализ работы газоперекачивающего агрегата по данным мониторинга

Газоперекачивающие агрегаты используются на компрессорных станциях для повышения давления в системе магистрального газопровода. В системе «Газпрома» на 2002 г. общее число ГПА составляло 4039 шт.

Одним из параметров, характеризующих эффективность работы ГПА, является температура на выходе центробежного нагнетателя. Чем выше степень повышения давления, тем выше эта температура. Вместе с тем высокая температура газа приводит к усилению коррозии и эрозии, разру-

шающих внутреннюю стенку трубопровода. Также она может означать неудовлетворительное техническое состояние каких-то элементов ГПА (износ каналов, увеличение торцевых и осевых зазоров для перетекания газа в центробежном нагнетателе). Поэтому для анализа в качестве параметра эффективности выбрана именно температура газа  $T_{2g}$  на выходе ГПА.

В упрощенном виде принципиальная схема связи параметров газа в ГПА показана на рис. 2. Температура газа на выходе ГПА определяется следующей формулой, используемой при проектировании:

$$T_{2g} = T_{1g}(P_{2g}/P_{1g})^{(n-1)/n}, \quad (5)$$

где  $n$  — показатель политропы сжатия газа, который является случайной величиной ( $n = 1,2 \div 1,7$ ) и зависит от переменных формулы (5), от степени изношенности проточной части центробежного компрессора, от торцевых и осевых зазоров и т. д.

Каждое состояние ГПА определяется набором множества измеряемых параметров, среди которых:

- обороты центробежного нагнетателя;
- объемный расход газа;
- обороты турбины высокого и турбины низкого давления;
- $P_0, T_0$  — давление и температура окружающей среды;
- $P_{1g}, T_{1g}$  — давление и температура газа на входе в ГПА;
- $P_{2g}, T_{2g}$  — давление и температура газа на выходе компрессора и т. д.

Поскольку целью работы является изложение принципов ЛВ-подхода, то будем рассматривать только параметры газа на входе ( $P_{1g}, T_{1g}$ ) и на выходе ( $P_{2g}, T_{2g}$ ) центробежного компрессора. Эти параметры измеряются для всех работающих ГПА через каждые 2 ч и сохраняются в центральной базе данных. Для анализа использовались данные за 2007 г. по одному из таких ГПА.

В соответствии с основами подхода для влияющих параметров необходимо ввести конечные множества значений (состояний). Все состояния



■ Рис. 2. Схема связи параметров газа в ГПА

системы сортируются по возрастанию выбранного параметра эффективности  $T_{2g}$ . В качестве исследуемого события выберем событие превышения температуры допустимого уровня  $T_{ad}$ :

$$T_{2g} > T_{ad}. \quad (6)$$

Соответственно, все состояния правее этого уровня считаются опасными. На рис. 3 представлено дискретное распределение параметра  $T_{2g}$  и обозначено допустимое значение ( $T_{2g} = 70^\circ\text{C}$ ).

По статистическим данным вычисляется риск превышения температурой порогового уровня:

$$Risk = N_{ad}/T, \quad (7)$$

где  $N_{ad}$  — число состояний в «хвосте» [для них выполняется условие (6)];  $T$  — общее число состояний в статистике; для рассматриваемых статистических данных  $Risk = 0,2$ .

Анализ риска выполняется по средствам расчета вкладов градаций влияющих параметров в правый «хвост» распределения параметра эффективности, т. е. в возможность возникновения нежелательного события. Будем использовать:

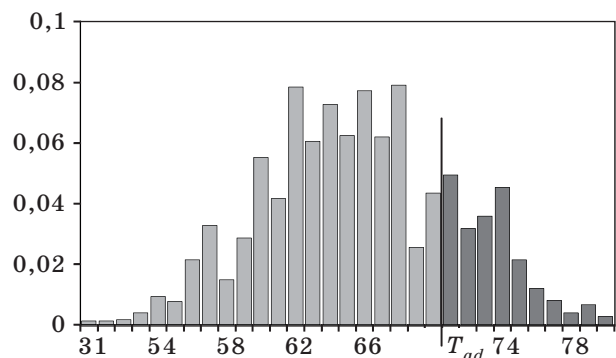
- 1) частотный анализ вкладов градаций параметров  $P_{1g}, T_{1g}, P_{2g}$ ;
- 2) вероятностный анализ вкладов градаций параметров  $P_{1g}, T_{1g}, P_{2g}$ .

В частотном анализе риска вклады определяются непосредственно по статистическим данным с использованием формулы

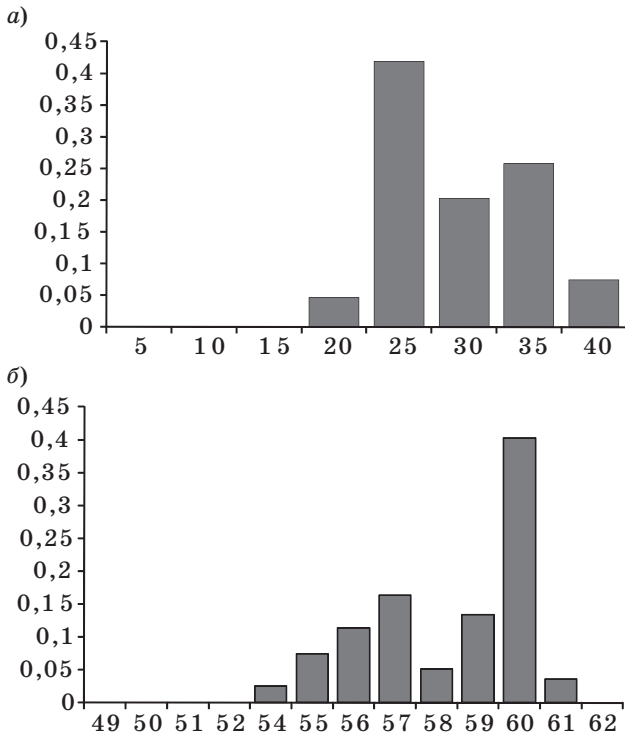
$$W_{jr} = \frac{N_{jr}^b}{N_{ad}}, \quad (8)$$

где  $N_{jr}^b$  — число опасных состояний, содержащих градацию  $r$  параметра  $j$ ;  $N_{ad}$  — число всех опасных состояний.

Эти вклады показывают степень влияния отдельных градаций на возможность возникновения нежелательного события (превышения порогового значения температуры  $T_{ad}$ ). На рис. 4 при-



■ Рис. 3. Дискретное распределение параметра  $T_{2g}$



■ Рис. 4. Вклады параметров  $T_{1g}$  (а) и  $P_{2g}$  (б) в правый «хвост» распределения параметра эффективности  $T_{2g}$

ведены вклады параметров  $T_{1g}$  и  $P_{2g}$ . Видно, что возможность превышения выходной температурой порогового значения резко возрастает, если температура на входе ГПА  $T_{1g}$  становится выше  $20\text{ }^\circ\text{C}$  либо выходное давление  $P_{2g}$  повышается до  $60\text{ кгс/см}^2$ .

В вероятностном анализе риска вклады определяются решением задачи классификации методом идентификации ЛВ-модели по статистическим данным. Логическая функция неуспеха (4) приводится в ортогональную форму

$$Y_f = z_1 \vee z_2 z_1 \bar{\vee} z_3 z_2 z_1 \bar{\vee} \dots, \quad (9)$$

которая позволяет подставлять вместо логических переменных вероятности соответствующих событий, а вместо конъюнкции и дизъюнкции — умножение и сложение. Таким образом, риск неуспеха при независимости влияющих параметров вычисляется с использованием вероятностного полинома:

$$Risk = p_1 + p_2(1-p_1) + p_3(1-p_2)(1-p_1) + \dots \quad (10)$$

Каждому состоянию системы из статистических данных (см. таблицу) соответствует полином вида (10). Таким образом, имеется система вероятностных полиномов:

$$\begin{aligned} p_{1r_1 \in N_1}^1 + p_{2r_2 \in N_2}^1 (1 - p_{1r_1 \in N_1}^1) + \\ + p_{3r_3 \in N_3}^1 (1 - p_{1r_1 \in N_1}^1) (1 - p_{2r_2 \in N_2}^1) + \dots = p^1; \\ \dots \\ p_{1r_1 \in N_1}^t + p_{2r_2 \in N_2}^t (1 - p_{1r_1 \in N_1}^t) + \\ + p_{3r_3 \in N_3}^t (1 - p_{1r_1 \in N_1}^t) (1 - p_{2r_2 \in N_2}^t) + \dots = p^t; \\ \dots \\ p_{1r_1 \in N_1}^T + p_{2r_2 \in N_2}^T (1 - p_{1r_1 \in N_1}^T) + \\ + p_{3r_3 \in N_3}^T (1 - p_{1r_1 \in N_1}^T) (1 - p_{2r_2 \in N_2}^T) + \dots = p^T, \quad (11) \end{aligned}$$

где  $p_{jr}$  — вероятность, с которой градация параметра вызывает опасное состояние системы по условию (6);  $r$  — номер градации;  $j$  — номер параметра. Эти вероятности являются вкладками, которые необходимо определить. Находятся они решением задачи идентификации методом градиентов или случайного поиска [1].

Общее число состояний системы велико (1) и только часть из них реализована в статистике. Результаты вероятностного анализа позволяют оценить риск превышения пороговой температуры для состояний ГПА, которые не встретились в статистических данных. Чтобы сделать это, необходимо подставить вероятности  $p_{jr}$ , соответствующие градациям влияющих параметров, в (10). Этим вероятностный анализ риска отличается от частотного, который распространяется только на имеющуюся статистику.

### Использование анализа риска по вкладкам для диагностики в режиме эксплуатации

Частотные и вероятностные вклады могут использоваться для диагностирования ГПА. В процессе многолетней работы многие детали и узлы изнашиваются, и очевидно, что величины вкладов для нового и старого ГПА будут отличаться. Поэтому при наличии вкладов, рассчитанных для нового эталонного ГПА, можно сравнивать их с текущими вкладками. Значительное отклонение величины вкладов может указывать на поломки и служить основанием для ремонта ГПА. Существуют методы диагностирования ГПА по средствам сравнения реальных характеристик с эталонными [4], однако эти характеристики нельзя снять в условиях эксплуатации на компрессорной станции. Диагностирование по средствам вкладов выполнимо, поэтому такой относительно дешевый подход является вполне перспективным.

## Заключение

Изложены основы ЛВ-подхода к управлению риском и эффективностью в структурно-сложных системах. Выделены два типа решаемых задач с разными логическими функциями.

Рассмотрена задача анализа риска и эффективности для такой сложной технической системы, как газоперекачивающий агрегат в системе газопроводов.

Описаны методы частотного и вероятностного анализа риска по вкладам градаций влияющих параметров в «хвост» параметра эффективности. Приведены примеры частотного анализа риска.

Обоснована перспективность использования частотного и вероятностного анализа риска для диагностики технических средств в режиме эксплуатации.

## Литература

1. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. 2-е изд. — СПб.: Бизнес-пресса, 2006. — 530 с.
2. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб.: Политехника, 2000. — 276 с.
3. Алексеев В. В., Соложенцев Е. Д. Логико-вероятностное моделирование риска портфеля ценных бумаг // Информационно-управляющие системы. 2007. № 6. С. 49–56.
4. Поляков Г. Н., Пиотровский А. С., Яковлев Е. И. Техническая диагностика трубопроводных систем. — СПб.: Недра, 1995. — 448 с.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*