



Общероссийский математический портал

Д. В. Немчинов, О. М. Проталинский, Снижение риска аварийной ситуации на производственном объекте, *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ.*, 2009, номер 1, 111–116

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

23 марта 2025 г., 14:54:50



Д. В. Немчинов, О. М. Проталинский

## СНИЖЕНИЕ РИСКА АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ

### Введение

Снижение риска аварий и отказов технологических объектов – одна из приоритетных задач управления промышленной безопасностью. В процессе эксплуатации производственного объекта часто возникает необходимость принимать обоснованные технические решения о выводе в ремонт оборудования, его реконструкции или замены. В условиях острой ограниченности материальных ресурсов возникают ситуации, когда приходится эксплуатировать оборудование со сроком службы большим, чем гарантированный, что приводит к увеличению риска возникновения отказов и аварийных ситуаций (АС). Определение риска АС позволяет специалисту оценить возможные последствия нарушения работоспособности с целью своевременного внесения соответствующих корректив, какого-либо из элементов сложной технической системы, будь то установка, агрегат, процесс или даже человек, под воздействием как внутренних (нарушение трудовой дисциплины, износ оборудования и т. п.), так и внешних (природные явления, диверсии и т. п.) факторов. Множество данных факторов невозможно не только измерить количественно, но и описать качественно. Такое обилие различных по природе факторов не может быть объединено в одну структуру и описано традиционными математическими методами – аналитическими, регрессионными или формальными моделями.

Особенность известных методов оценки риска – акцент на составляющую последствий возможных аварий и соответствующие меры по снижению возможного ущерба. При этом недостаточное внимание уделяется мероприятиям по предотвращению самих аварий, что связано, главным образом, с трудностями оценки вероятности возникновения соответствующих происшествий [1].

В связи с этим возникает задача многофакторного анализа рисков возникновения АС на основе системного анализа и методологии построения систем поддержки принятия решений, позволяющая принимать решения по снижению рисков АС на основе данных о технологическом процессе в условиях недостаточного объема и неопределенности исходной информации.

Принятие решения по снижению риска аварии осуществляется в три этапа:

- выявление факторов опасности;
- определение риска по каждому сценарию развития аварии;
- определение набора мероприятий по снижению риска.

Выстраиванию причинной цепи предпосылок аварии способствуют факторы опасности, обусловленные ошибками персонала, отказами оборудования и нерасчетными внешними воздействиями со стороны рабочей и внешней среды. Введена следующая классификация факторов: параметрические, технологические, технические, аппаратурные, субъективные. По используемым данным факторы опасности разделены на два вида:

- непосредственно параметры состояния объекта, измеряемые традиционным способом в реальном времени;
- параметры, которые не поддаются непосредственному измерению, представленные в виде текстового описания, таблиц, диаграмм и экспертных оценок.

Кроме того, факторы разделены непосредственно на факторы технологического процесса (параметрические, технологические, технические, аппаратурные) и факторы влияния человека на технологический процесс (субъективные).

К *параметрическим* факторам отнесены параметры технологического процесса, измеряемые традиционным способом: концентрация, температура, давление, масса, расход и т. д. К *технологическим* факторам отнесены дефекты изготовления оборудования, качество материалов, коррозионная стойкость трубопроводов, арматуры и оборудования, износ оборудования. *Технические* факторы определяют тип оборудования, соответствие техническим условиям. *Аппаратурные* факторы определяют качество работы измерительных приборов, средств автоматизации. К *субъективным* факторам отнесены ошибочные действия персонала, организация технического обслуживания и ремонта.

Для определения уровня влияния каждого фактора на АС введены показатели состояния объекта: по параметрическому фактору – параметрический показатель  $S_1$ ; по технологическому фактору – технологический показатель  $S_2$ ; по техническому фактору – технический показатель  $S_3$ ; по аппаратурному фактору – аппаратурный показатель  $S_4$ ; по субъективному фактору – субъективный показатель  $S_5$ . Для определения уровня риска всего объекта введен показатель уровня риска  $Ra$ .

К показателям состояния объекта предъявляются следующие требования: показатели должны быть безразмерными величинами, изменяющимися в диапазоне (0–1); показатели должны учитывать влияние всех параметров, входящих в соответствующие факторы; значения показателей равно нулю, если все параметры факторов опасности находятся в зоне нормальных значений; значение показателей состояния по факторам опасности равно единице, если хотя бы один параметр соответствующих факторов находится в предельно допустимой зоне; значение показателя уровня риска объекта равно единице, если хотя бы один показатель состояния по любому фактору равен единице.

При определении состояния объекта по факторам опасности, измеряемым в реальном времени традиционным способом, предлагается использовать показатель состояния, непосредственно зависящий от параметров технологического процесса. Под оценкой параметрического показателя будем понимать нахождение объекта в нормальном, предаварийном и аварийном состоянии. При этом параметрический показатель является непрерывной величиной, зависящей только от непрерывных переменных, т. е. представляет собой непрерывную функцию непрерывных аргументов  $S_1 = f(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ .

Для придания каждому из параметров технологического процесса веса, отражающего его значимость в ходе определения  $S_1$ , предлагается прибегнуть к опросу экспертов.

Преобразуем текущее значение параметра  $p_i$ ,  $1 < i < n$ , в безразмерную величину  $q_i$ , если он имеет одну или две зоны опасных значений:

$$q_i = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i < p_i^{ll}, \\ \frac{p_i^l - p_i}{p_i^l - p_i^{ll}}, & \text{если } p_i^{ll} < p_i < p_i^l, \\ \frac{p_i - p_i^h}{p_i^{hh} - p_i^h}, & \text{если } p_i^h < p_i < p_i^{hh}, \\ 1, & \text{если } p_i > p_i^{hh}, \end{cases}$$

где  $p_i$  – текущее значение параметра;  $p_i^l, p_i^h$  – предупредительные значения параметра;  $p_i^{ll}, p_i^{hh}$  – предельно допустимые значения параметра.

В результате все параметры  $p_i$  являются безразмерными и изменяются в диапазоне (0–1).

Значение параметрического показателя определим по принципу логико-вероятностной оценки [2]:

$$S_1 = q_1 + q_2(1 - q_1) + q_3(1 - q_1)(1 - q_2) + \dots + q_n(1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_{n-1}).$$

Формальное описание множества факторов опасности, учитываемых при оценке технологического, технического, аппаратурного и субъективного показателей состояния объекта, представлено следующим образом:

$$Z = \{z_i(F, w, k)\}, i = 1, n, \quad (1)$$

где  $z_i$  –  $i$ -й фактор опасности;  $F$  – оценка фактора опасности;  $k = \{\text{«низкий»}, \text{«средний»}, \text{«высокий»}\}$  – уровень доверия к оценке фактора опасности;  $w$  – степень влияния на формирование отказа и аварии.

При этом показатель состояния объекта  $S$  есть функция оценок факторов опасности  $S = f(z_1, \dots, z_n)$ . Влияющие факторы рассматриваются как лингвистические переменные, которые заданы на соответствующих универсальных множествах при помощи лингвистического терм-множества.

Для оценки показателей состояния объекта  $S_2, S_3, S_4, S_5$  по влиянию факторов опасности  $Z(z_1, \dots, z_n)$  используется продукционная база знаний, включающая в себя базу данных и базу правил с использованием логических правил типа ЕСЛИ – ТО.

Базы данных по факторам формируются на основе экспертных оценок параметров  $z_1, \dots, z_n$ , а также на основании результатов диагностики оборудования и нормативных актов.

Для определения показателей состояния объекта введена лингвистическая переменная «Состояние объекта по фактору»  $G$ . Терм-множество представлено двумя элементами: «нормальное»  $g_1$ , «близкое к аварийному»  $g_2$  на универсальном множестве  $\{0 \dots 10\}$ . При этом нечеткие множества «нормальное» и «близкое к аварийному» подразумеваются как дополнения друг к другу [3], и, соответственно, функция принадлежности  $\mu_{g_1} = 1 - \mu_{g_2}$ .

База правил формируется на основании данных, полученных от экспертов объекта. В зависимости от сложности описания объекта базу правил можно формировать как для состояния «нормальное», так и для состояния «близкое к аварийному». Учитывая, что в технологических регламентах, правилах, инструкциях по эксплуатации оборудования диапазон изменения параметров объекта и требования к обслуживанию оборудования указаны для нормальной и безопасной эксплуатации оборудования, предлагается формировать базу правил для состояния «нормальное».

Для того чтобы существенно сократить затраты машинного времени, используем следующий метод расчета функции принадлежности [4]:

$$\mu_k^{G_{\text{тек}}} = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j_1=1}^{J_{z_1}} (\mu_{j_1}^{z_1} * \mu_{j_1}^{z_{\text{тек}}}) * \sum_{j_2=1}^{J_{z_2}} (\mu_{j_2}^{z_2} * \mu_{j_2}^{z_{\text{тек}}}) * \dots * \sum_{j_N=1}^{J_{z_N}} (\mu_{j_N}^{z_N} * \mu_{j_N}^{z_{\text{тек}}}) * \mu_k^G \right), \quad (2)$$

где  $J_{z_N}$  – количество элементов нечеткого множества, описывающего  $z_N$ -й параметр;  $m$  – количество правил. Здесь операторы  $\Sigma$  и  $*$  обозначают логическое сложение и умножение.

Принадлежность текущего состояния объекта по каждому фактору к аварийному состоянию определяется функцией принадлежности  $\mu_k^{G_{\text{тек}}}$ .

Логично предположить, что показатель состояния  $S$  можно определить как максимальное значение  $\mu_i^{G_{\text{тек}}}$ , где  $i = 1 \dots k$ ,  $k$  – количество элементов нечеткого множества, описывающего  $G$ . Обозначим функцию принадлежности текущего состояния к заданному в базе правил:

$$\mu_{z_{N\text{тек}}}^{z_N} = \sum_{j_N=1}^{J_{z_N}} (\mu_{j_N}^{z_N} * \mu_{j_N}^{z_{N\text{тек}}}), \quad (3)$$

где  $J_{z_N}$  – количество элементов нечеткого множества, описывающего  $z_N$ -й параметр в правиле  $i$ . Из выражения (2) следует, что принадлежностью текущего состояния объекта к состоянию «нормальное» по каждому правилу  $m$  является минимальное значение из выражения (3). Для учета изменений остальных функций (3) при определении показателя состояния  $S$  вместо логических операций применяются алгебраические произведения и суммы [4].

Для одного правила показатель состояния  $S$  представлен как

$$S_1 = \prod_{k=1}^N \mu_{z_{k\text{тек}}}^{z_k},$$

где  $N$  – количество параметров в правиле;  $\Pi$  – оператор алгебраического произведения.

Для  $m$  правил, определяющих «нормальное» состояние объекта  $S$ , определено:

$$S_{\text{норм}} = S_1 + \sum_{i=2}^m \left[ S_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - S_j) \right],$$

где  $\Sigma$  и  $\Pi$  соответственно алгебраическая сумма и алгебраическое произведение.

Так как состояния «нормальное» и «близкое к аварийному» являются дополнениями друг к другу, то показатель состояния по фактору  $Z$  к состоянию «близкое к аварийному» определен:

$$S_{\text{авар}} = 1 - S_{\text{норм}}.$$

В результате получим значение показателей состояния объекта  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  по каждому из факторов опасности. Очевидно, что максимальный вклад в возникновение АС внесет фактор с наибольшим показателем  $S$ , в связи с чем можно принять решение о снижении опасности АС. Риск АС на объекте по всем факторам определим по принципу логико-вероятностной оценки [2]:

$$Ra = S_1 + S_2 Q_1 + S_3 Q_1 Q_2 + S_4 Q_1 Q_2 Q_3 + S_5 Q_1 Q_2 Q_3 Q_4,$$

где  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  – показатели состояния объекта;  $Q_1 = 1 - S_1, Q_2 = 1 - S_2, Q_3 = 1 - S_3, Q_4 = 1 - S_4$ .

$Ra$  всегда находится в пределах  $[0, 1]$  при любых значениях  $S$  и учитывает влияние всех факторов.

Результатом анализа риска является определение уровня риска развития АС  $Ra = f(S)$ .

При формировании рекомендаций по снижению риска АС на производственном объекте, на основе полученных данных об уровне риска, опираемся на использование двух альтернативных задач снижения риска [3]: при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта либо обеспечить снижение риска до приемлемого уровня при минимальных затратах.

Для определения приоритетности выполнения решений по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов определяется совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования, и производится ранжирование по показателю «эффективность – затраты».

Первоначально для производственного объекта формируется база данных множества мероприятий  $M = \{m_i\}$  по снижению риска АС. Каждому мероприятию присваиваются две характеристики:  $G$ -затраты на внедрение и  $\Phi = \{\phi_n\}$  – ожидаемое воздействие на оценки факторов опасности, где  $\phi_n$  – воздействие на оценку фактора опасности. Принятие решения представляет собой выбор подмножества мероприятий  $MP_j$  из множества мероприятий  $M$ . При этом эффективность снижения риска при внедрении определенного количества мероприятий не является суммой эффективности от внедрения каждого отдельного мероприятия.

При определении мероприятий по первой задаче при фиксированных средствах  $G_{\text{зад}}$  определяется такой набор мер  $MP_j = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ , внедрение которого максимально снижает риск возникновения аварии  $R_{AC} = f(S)$ .

$$\begin{cases} \Delta R_{AC} = f(\Delta S_n) \rightarrow \max, \\ \sum_i G_i \leq G_{\text{зад}}. \end{cases}$$

При определении мероприятий по второй задаче определяется такой набор мер  $MP_j$ , внедрение которого снижает риск  $R_{AC} = f(S)$  до заданного уровня  $R_{\text{зад}}$  при минимальных затратах  $G_j$ .

$$\begin{cases} \sum_i G_i \rightarrow \min, \\ R_{AC} - \Delta R_{AC} \leq R_{\text{зад}}, \end{cases}$$

где  $\Delta R_{AC} = R_{AC} - R_{AC}^{mi}$ ;  $R_{AC}$  – показатель уровня риска объекта до внедрения мероприятий;  $R_{AC}^{mi}$  – показатель уровня риска объекта после внедрения мероприятий.

Для реализации мероприятий по снижению риска применяется либо первая, либо вторая задача, в зависимости от конкретного сценария возникновения АС и выделения средств на повышение промышленной безопасности производственного объекта.

Для определения эффективности мероприятий необходимо знать стоимость внедрения конкретного мероприятия и его влияние на снижение уровня риска. По каждому объекту, входящему в технологический процесс, на основе экспертных данных формируется набор мероприятий, позволяющий снизить показатель аварийного состояния по каждому фактору. На основе вычисленных показателей состояния, определяющих уровень риска в системе, выделяются объекты с показателем уровня риска  $R_i > 0$ , определяются факторы с максимальным показателем уровня риска  $S$  и на основе продукционной базы знаний определяется комплекс мероприятий по снижению показателя уровня риска:

ЕСЛИ качество материалов трубопроводов «низкое», техническое состояние трубопровода «среднее», ...

ТО «мероприятие 1 = провести диагностику трубопровода» с весом  $\varphi_1$ .

ЕСЛИ техническое состояние трубопровода «очень низкое», ...

ТО «мероприятие 2 = замена трубопровода» с весом  $\varphi_2$ .

ЕСЛИ техническое состояние трубопровода «низкое», ...

ТО «мероприятие 3 = провести диагностику» с весом  $\varphi_3$ .

В результате получим набор мероприятий  $MP_j = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  по каждому фактору и по каждому объекту системы. Вес мероприятия  $\varphi$  в базе знаний представляет собой воздействие данного мероприятия на снижение показателя состояния по отдельному фактору. Определить вес мероприятия можно с использованием знаний о текущем состоянии объекта и состоянии объекта после внедрения мероприятия  $m_i$ . Используя предложенный метод [2] можно рассчитать текущий показатель состояния по отдельному фактору без внедрения мероприятия  $m_i$  и с внедрением мероприятия  $m_i$ , предварительно изменив оценки параметров, входящих в фактор. Соответственно, вес мероприятия  $m_i$  определяется:

$$\varphi_{Z_i}^{m_i} = S_Z^{\text{тек}} - S_Z^{m_i},$$

где  $S_Z^{\text{тек}}$  – показатель состояния по фактору  $Z$  до внедрения мероприятия  $m_i$ ;  $S_Z^{m_i}$  – показатель состояния по фактору  $Z$  после внедрения мероприятия  $m_i$ .

Показатель уровня риска объекта после внедрения мероприятия  $m_i$ :

$$R_{AC}^{m_i} = f(S_{Z_1}^{m_i}, \dots, S_{Z_n}^{m_i}).$$

При внедрении набора мероприятий  $MP_j$  оценку эффективности по фактору  $Z_i$  произведем:

$$\Delta S_{Z_i}^{MP_j} = S_{Z_i}^{\text{тек}} - S_{Z_i}^{MP_j},$$

$$S_{Z_i}^{MP_j} = f(S_{Z_1}^{m_1}, \dots, S_{Z_i}^{m_k}).$$

Общий эффект внедрения мероприятий определим как

$$\Delta R_{AC} = R_{AC} - R_{AC}^{MP_j},$$

или

$$\Delta R_{AC} = f(\Delta S_{Z_1}^{MP_j}, \dots, \Delta S_{Z_n}^{MP_j}).$$

Он равен изменению показателя риска в результате применения всего набора мероприятий  $MP_j$ .

Линейный эффект внедрения набора мероприятий  $MP_j$  по фактору  $Z_i$  обозначим:

$$\Delta SI_{Z_i}^{MP_j} = S_{Z_i}^{\text{тек}} - SI_{Z_i}^{MP_j},$$

$$SI_{Z_i}^{MP_j} = f(S_{Z_1}^{m_1}) + \dots + f(S_{Z_i}^{m_k}).$$

По всем факторам:

$$\Delta RI_{AC} = f(\Delta SI_{Z_1}^{MP_j}, \dots, \Delta SI_{Z_n}^{MP_j})$$

он равен сумме изменений показателей риска при внедрении мероприятий по отдельности к исходной модели.

При этом выполняются соотношения:

$$S_{Z_i}^{MP_j} < SI_{Z_i}^{MP_j},$$

$$\Delta R_{AC} < \Delta RI_{AC}.$$

Для определения оптимального набора мероприятий  $MP_j$  сделаем допущение о независимости мероприятий по снижению риска друг от друга, используя в качестве меры эффективности их индивидуального внедрения.

### **Заключение**

Наши исследования по внедрению мероприятий для снижения риска АС на установке хлорирования воды показали, что их эффективность выше, чем эффективность внедрения мероприятий по снижению риска, предложенных экспертами.

Применение многофакторного анализа риска с использованием методологии экспертных систем позволяет определить мероприятия по снижению риска АС и эффективность их внедрения на производственном объекте с учетом данных о технологическом процессе в условиях недостаточного объема и неопределенности исходной информации.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. *ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических схем.* – М.: Изд-во стандартов, 2002.
2. *Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике.* – СПб.: Изд. дом «Бизнес-пресса», 2004. – 216 с.
3. *Беллман Р., Задэ Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: сб. переводов.* – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
4. *Проталинский О. М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов.* – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. – 183 с.

Статья поступила в редакцию 14.01.2009

### **REDUCTION OF EMERGENCY RISK ON A PRODUCTION OBJECT**

*D. V. Nemchinov, O. M. Protalinskiy*

The method of definition of emergency risk on the base of the system analysis and design methodologies of decision support systems is offered in the paper. The classification of factors influencing upon arising of an emergency, is done. The index of object state, defining the influence of the factor on arising of an emergency, is given to each factor. An optimal set of actions to reduce the risk is defined on the base of production knowledgebase and influence of the action reflecting its introduction efficiency.

**Key words:** system analysis, emergency risk, risk, decision support systems.