

- поиск узких мест в ТПП на основе постановки имитационных экспериментов (ИЭ);
- определение пропускной способности ТПП, в которых функционируют вероятностные ТП;
- оценка характеристик надежности и безопасности ТПП;
- выбор рациональных вариантов организации ТПП;
- поиск критических путей в сетевых графиках производства по времени их реализации, стоимости реализации, расходу материалов и комплектующих изделий.

5 Технологии использования ПТКИ ТПП для реализации методик решения задач проектного моделирования вероятностных ТПП:

- оценка технологических характеристик имитационных моделей;
- проведение их верификации и проверки адекватности на реальных примерах (апробация методов, средств, методик и технологий исследования ТПП);
- внедрение результатов в практику научных исследований для заинтересованных министерств, ведомств, высших учебных заведений и промышленных предприятий.

УДК 656.2.08 (075.8)

## ОБ ОЦЕНКЕ РИСКА И БЕЗОПАСНОСТИ

Л. А. СОСНОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта

Проблема оценки риска и безопасности имеет важное значение для работы подвижного состава (ухудшение технического состояния локомотивов, вагонов и пути, нарушение безопасности движения поездов и др.).

Согласно разрабатываемой концепции, риск – это ожидание любых неблагоприятных событий (ситуаций), например, ожидание нарушений правил безопасности движения, повреждений оборудования и/или его элементов, аварий и т.д.

Если вероятность неблагоприятных событий (ситуаций)

$$0 \leq P(A) = P(A_1, A_2, \dots, A_n) \equiv P \leq 1, \quad (1)$$

а вероятность благоприятных событий (ситуаций)

$$0 \leq Q(B) = Q(B_1, B_2, \dots, B_n) \equiv Q \leq 1, \quad (2)$$

то риск

$$0 \leq \rho(A, B) = \frac{P(A)}{Q(B)} \Lambda(A \leftrightarrow B) \equiv \rho \leq \infty \quad (3)$$

при условии, что

$$P(A) + Q(B) = \text{Const} = 1, \quad \Lambda(A \leftrightarrow B) \geq 1,$$

где  $\Lambda(A \leftrightarrow B)$  – функция взаимодействия событий  $A_i$  и  $B_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Безопасность трактуется как противоположность риска; тогда

$$R_p + \rho = 1, \quad (4)$$

откуда следует, что интервал возможного изменения показателя безопасности

$$-\infty \leq R_p \leq 1. \quad (5)$$

Риск и, следовательно, нарушения безопасности возникают, например, в процессе и вследствие повреждаемости объектов, которая определяется силовой ( $\sigma$ ), фрикционной ( $\tau$ ), термодинамической ( $T$ ), химической ( $Ch$ ) и др. нагрузками, временем эксплуатации ( $t$ ), а также физико-механическими свойствами ( $m$ ) материалов, из которых изготовлены их элементы:

$$0 \leq \omega_z = f(\sigma, \tau_w, T, Ch, t, m_j, \dots) \leq \infty. \quad (6)$$

На основании (3) – (6) устанавливается взаимосвязь показателей поврежденности, риска и безопасности. Если функции  $\omega_z$  придать обобщенный смысл, то определенным численным значениям параметров  $\omega_z$ ,  $\rho$ ,  $R_p$  можно поставить в соответствие практически любые ситуации и состояния не только техногенного, но и природного происхождения, что и сделано в таблице 1.



Таблица 1 – Количественная характеристика ситуаций и состояний объектов

| Ситуации   | Поврежденность |                |                                | Риск                |                     | Безопасность               |                     |
|------------|----------------|----------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
|            | Состояние      |                | $\omega_{\Sigma}$              | Состояние           | $\rho$              | Состояние                  | $R_p$               |
| Инциденты  | A              | Неповрежденное | 0                              | Нулевой риск        | 0                   | Абсолютная безопасность    | 1                   |
|            | B              | Поврежденное   | $0 < \omega_{\Sigma} < 1$      | Ограниченный риск   | $0 < \rho < 1$      | Ограниченная безопасность  | $1 > R_p > 0$       |
|            | C              | Предельное     | $1 = \omega_c$                 | Критический риск    | $1 = \rho_k$        | Нулевая безопасность       | 0                   |
| Катастрофы | D              | Запредельное   | $1 < \omega_{\Sigma} < \infty$ | Закритические риски | $1 < \rho < \infty$ | Отрицательная безопасность | $0 > R_p > -\infty$ |
| Катаклизмы | E              | Разложение     | $\infty$                       | Бесконечный риск    | $\infty$            | Абсолютная опасность       | $-\infty$           |

Используя (6), введем коэффициент безопасности

$$\infty \geq k_{\omega} = \frac{1}{\omega_{\Sigma}} \geq 0 \tag{7}$$

и параметр деградации  $D_e$ , определяемый уровнем поврежденности в соответствии с потерей безопасности:

$$0 \leq \frac{1}{\hat{a}^{\hat{e}\omega}} = D_e = \frac{1}{e^{1/\omega_{\Sigma}}} \leq 1. \tag{8}$$

Взаимосвязь показателей (6), (7) и (8) и их соответствие различным состояниям и ситуациям техногенного и природного происхождения представлены в таблице 2.

Из анализа (3) – (8) следуют несколько заключений.

1) абсолютно безопасны ( $R_p = 1$ ) лишь неповрежденные объекты ( $\omega_{\Sigma} = 0$ ); риск их эксплуатации, естественно, отсутствует ( $\rho = 0$ ), поэтому и параметр деградации  $D_e = 0$ ;

2) ограниченная безопасность характерна для объектов, имеющих повреждения ( $\omega_{\Sigma} < 1$ ), риск их эксплуатации заключен в интервале  $0 < \rho < 1$ ; увеличение риска есть соответствующее снижение безопасности ( $1 > R_p > 0$ ), поэтому параметр деградации  $0 < D_e < 1/e$ ;

3) когда риск становится критическим ( $\rho_k = 1$ ), наступает предельное состояние объекта, характеризованное предельным уровнем повреждений ( $\omega_c = 1$ ); параметр деградации в таком случае  $D_c = 1/e \approx 0,37$  – это аварийная ситуация, для которой характерна нулевая безопасность ( $R_p = 0$ );

4) отрицательная безопасность – это грозная опасность без каких бы то ни было гарантий безопасности. Катастрофа возможна, когда система переходит в соответствующее запредельное состояние ( $\omega_{\Sigma} \gg 1$ ), для которого риски будут закритическими ( $\rho \gg 1$ ), а параметр деградации  $D_e \gg 1/e$ ;

5) абсолютная опасность ( $R_p = -\infty$ ) тождественна бесконечному риску ( $\rho = \infty$ ); в таких условиях, по-видимому, наступают катаклизмы, при которых происходит разложение объектов ( $D_e = 1, \omega_{\Sigma} = \infty$ ).

Таблица 2 – Соответствие численных значений функции поврежденности  $\omega_{\Sigma}$ , коэффициента безопасности  $k_{\omega}$  и показателя деградации  $D_e$

| Состояние по поврежденности |                | $\omega_{\Sigma}$              | $k_{\omega}$              | $D_e$           | Ситуации                |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|
| A                           | Неповрежденное | 0                              | $\infty$                  | 0               | Абсолютная безопасность |
| B                           | Поврежденное   | $0 < \omega_{\Sigma} < 1$      | $1 < k_{\omega} < \infty$ | $0 < D_e < 1/e$ | Инциденты               |
| C                           | Предельное     | $1 = \omega_c$                 | $1 = k_c$                 | $1/e = D_c$     | Аварии                  |
| D                           | Запредельное   | $1 < \omega_{\Sigma} < \infty$ | $0 < k_{\omega} < 1$      | $1/e < D_e < 1$ | Катастрофы              |
| E                           | Разложение     | $\infty$                       | 0                         | 1               | Катаклизмы              |

Для практического расчета и анализа показателей риска и безопасности удобны формулы

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{P(A)} - 1} = \frac{1}{Q(B)} - 1 = \frac{1}{k_p - 1} = k_Q - 1; \quad (9)$$

$$R_p = 2 - \frac{1}{Q(B)} = \frac{1 - 2P(A)}{1 - P(A)} = 1 - k_Q P(A) = 1 - \frac{1}{k_p Q(B)}, \quad k_p = 1/P(A), \quad k_Q = 1/Q(A). \quad (10)$$

В общем случае расчет вероятности (1) можно выполнить по формуле

$$P(A) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)] \right\} \Lambda_A, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

Если для анализа принять какой-либо конкретный объект, например, металл-полимерную силовую систему, работающую в условиях фрикционно-механической усталости, то формула (11) конкретизируется следующим образом:

$$P = \left[ 1 - \exp \left\{ - \frac{C_v}{1 - D_{\sigma(t)}} \frac{V_{py}}{V_0} \left[ \left( \frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma - \sigma_{lmin}}{\sigma_w} \right]^{m_v} - C_s \frac{S_{py}}{S_k} \left( \frac{T_{ff}^{(1)} \Delta T_{\Pi}}{T_d - T_w} \right)^{m_s} \right\} \right] \Lambda_{\sigma/T}, \quad (12)$$

а конкретизация функции (6), например, применительно к металл-металлическим системам имеет вид

$$\omega_{\Sigma} = \frac{\Lambda_{TM}}{U_0} \left[ \frac{a_T}{1 - D_T} T_{\Sigma} + \Lambda_{\sigma/T} \left( \frac{a_{\sigma}}{1 - D_{\sigma}} \sigma^2 + \frac{a_T}{1 - D_T} T_w^2 \right) \right]. \quad (13)$$

Формулу (13) используют для анализа поврежденности в связи с изменением уровня силовых, фрикционных, химических и термодинамических нагрузок. А изменение поврежденности во времени (характеризуемого числом циклов  $n$  нагружения) описывается уравнением

$$\omega_{\Sigma n} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n}{N} \right)^h \right]^q \delta(t), \quad \delta(t) = e^{-\gamma + \beta} = e^{\beta \left( 1 - \frac{\gamma}{\beta} \right)} = \frac{1}{e^{\left( 1 - \frac{\beta}{\gamma} \right)}}, \quad (14)$$

где  $\delta$  – диалектическая функция, учитывающая влияние форс-мажорных обстоятельств, поскольку она включает функции как благоприятных ( $\gamma$ ), так и неблагоприятных ( $\beta$ ) событий (ситуаций):

$$\gamma = \gamma(y_1, y_2, \dots, y_n, t), \quad \beta = \beta(z_1, z_2, \dots, z_n, t).$$

Таким образом, согласно развиваемому подходу:

- 1) риск всегда больше, чем вероятность неблагоприятных событий ( $\rho > P(A)$ );
- 2) безопасность всегда меньше, чем вероятность благоприятных событий ( $R_p < Q(B)$ );
- 3) риск (как поврежденность, или разупрочнение) может быть неограниченно большим ( $\rho \rightarrow \infty$ );
- 4) безопасность (как и неповрежденность или упрочнение) не может быть бесконечно большой – она существенно конечна ( $R_p \rightarrow 1$ );
- 5) риск не может быть отрицательным ( $\rho > 0$ );
- 6) опасность трактуется как отрицательная безопасность ( $R_p < 0$ ).

Заметим, что в анализе рисков обнаруживается так называемое золотое сечение:

$$\rho = \frac{P(A)}{Q(B)} = \frac{0,382}{0,618} = \frac{P_c}{Q_c} = 0,618 = \rho_c.$$

Тогда можно записать:

$$\Phi^0 = 1 = \rho_k = \frac{0,5}{0,5} = \frac{P(A)}{Q(B)}, \quad \Phi^{-1} = 0,618 = \rho_c = Q_c,$$

$$\Phi^{-2} = 0,382 = P_c \approx D_c = \frac{1}{e}, \quad \Phi^1 = 1,618 = \frac{\rho_k}{\rho_c} = \frac{1}{0,618} \approx \frac{1}{Q_c}.$$

В докладе дан анализ риска и безопасности применительно к конкретным событиям (ситуациям), например, при нарушении правил безопасности движения поездов, при ухудшении качества материалов по механическим свойствам и др.