

9. Красикова И.Е., Красиков И.В., Картузов В.В. Корреляция значений фрактальных характеристик структуры материала по электронно-микроскопическим фотографиям поверхности образцов со значениями их физико-механических характеристик (<http://www.materials.kiev.ua/publications/EMMM/2016/2.pdf>) (Дата обращения 20.03.2020)

### Сведения об авторе

*Ахметханов Расим Султанович*, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, т. 8(495)623-57-55, e-mail: mibsts@mail.ru

УДК 531.8

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-05-3

## МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Д.О. Резников*

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

*Представлена матричная многоуровневая модель описания процессов распространения аварии в сложных технических системах, включающая четыре масштабно-структурных уровня: уровень конструкционного материала; уровень отдельных элементов системы; системный уровень и уровень внешней среды, окружающей систему и разработка системы оценки рисков. Разработанная модель позволяет оценивать не только так называемые прямые риски, которые учитывают прямые экономические последствия аварий в системе без учета ущербов окружающей техногенной среде, но также и косвенные риски, связанные с вторичными отказами в окружающей среде, которые инициируются аварией в системе*

**Ключевые слова:** угроза, уязвимость, ущерб, риск.

## MULTILEVEL MODELS FOR ASSESSMENT IF RISKS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

*D.O. Reznikov*

Institute of Machine Sciences of the RAS

*The paper present samul tilevel matrix model for describing the process of accident propagation that includes four scale-structural levels: the level of structural material, the level of technical components, the systemic level and the level of the external environment. The models allows assessing not only the so-called direct risks that take into account the expected monetary*

*values of direct consequences of the accidents at the system disregarding losses inflicted by subsequent disturbances in the environment of the damaged system, but also indirect risks associated with secondary failures in the system environment that are triggered by the system failure.*

**Keywords:** threat, vulnerability, loss, risk.

## 1. Введение

Сложные технические системы (СТС) характеризуются сложной структурой и сложным характером взаимодействия между их элементами, которые определяют способность систем перераспределять нагрузки и противостоять каскадным отказам, возникающим после локального отказа их отдельных элементов [1-6]. Эти системы, как правило, подвергаются множественным режимам нагружения и сценариям накопления повреждений и разрушения. Из-за высокого уровня неопределенности относительно конструктивных параметров СТС, условий окружающей среды и внешних воздействий, оценка функционирования системы должна проводиться в вероятностной постановке. Их эволюция должна описываться многомерными деревьями сценариев, которые включают в себя сценарии аварий и катастроф. Ввиду того, что процессы накопления и повреждений и разрушения развиваются на различных масштабных уровнях, эти деревья сценариев должны быть многоуровневыми [6-8].

Следует также отметить, что СТС обычно тесно связаны с другими техническими системами, которые в дальнейшем называются сопряженными системами или средой. Повреждение или отказ СТС может вызвать вторичные и каскадные отказы в сопряженных системах. Таким образом, необходим общий вероятностный подход, который позволит: (1) описать процесс возникновения и распространения аварии на четырех масштабных уровнях: уровне конструкционного материала, уровне элементов системы, системном уровне и уровне внешней среды, и (2) сформировать процедуру оценки рисков, генерируемых СТС. При этом разрабатываемый подход должен предоставить возможность оценивать не только так называемые прямые риски, которые учитывают прямые последствия аварий в СТС, игнорируя ущербы, вызванные последующими нарушениями в во внешней среде, но и косвенные риски, связанные с вторичными отказами в сопряженных системах.

## 2. Традиционные модели оценки рисков

Согласно традиционной модели оценки риска, риск считается функцией угрозы  $T$ , уязвимости  $V$  и последствий  $C$ :  $R = f(T, V, C)$ . Здесь угроза определяется как вероятность некоторого воздействия на систему (штатный или нештатный режим нагружения)  $T = P(L)$ ; уязвимость оценивается как условная вероятность отказа системы при условии воздействия  $L$ :  $V = P(F | L)$ ; а последствия определяются как ущербы, возникающие в результате воздействия и последующего отказа системы:  $C = E(U | L, F)$ . Тогда индекс экономического риска определяется по формуле (1):

$$R = P(L) \cdot P(F | L) \cdot E(U | L, F). \quad (1)$$

Обычно технические системы подвергаются нескольким режимам нагружения и множеству сценариев отказов. Оценка риска для таких систем подразумевает оценку дерева сценариев (рис. 1), которая осуществляется с помощью графологических моделей, называемых деревьями сценариев [3, 5]. Рассматриваемая система разработана для выполне-

ния так называемого сценария успеха  $S_0$  (то есть перехода из начального состояния  $IS$  в заданное конечное состояние  $ES_0$ ). Поскольку любой сценарий отказа  $S_i$  представляет отклонение от сценария успеха  $S_0$ , которое соответствует успешному функционированию СТС, сценарий  $S_j$  должен иметь точку возмущения (исходное событие), в которой возникает экстремальное событие или режим нагружения  $L_j$  (рис. 1). Каждое событие  $L_j$  порождает ветвь дерева сценариев, которая имеет соответствующий набор сценариев  $S_j$ , оканчивающихся конечными состояниями ( $ES_j$ ). При этом для случая множественных режимов нагружения и сценариев развития аварии можно оценить индекс риска, используя матричное выражение:

$$R = \underbrace{\{P(L_1); P(L_2); \dots; P(L_n)\}}_{\text{Угроза } \{L\}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P[ES_1 | L_1] & P[ES_2 | L_1] & \dots & P[ES_m | L_1] \\ P[ES_1 | L_2] & P[ES_2 | L_2] & \dots & P[ES_m | L_2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P[ES_1 | L_n] & P[ES_2 | L_n] & \dots & P[ES_m | L_n] \end{bmatrix}}_{\text{Уязвимость } [V]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} U_{ES_1} \\ U_{ES_2} \\ \dots \\ U_{ES_m} \end{bmatrix}}_{\text{Последствия } \{U\}} \quad (2)$$

Матричное уравнение (2) дает оценку экономического риска, генерируемого рассматриваемой системой. Он включает вектор режимов нагружения  $\{L\}$ , описывающих вероятности различных нормальных и аномальных режимов термомеханического нагружения, воздействия агрессивной среды и т. д.); матрицу уязвимости  $[V]$ , элементы которой обеспечивают условные вероятности того, что система достигнет различных поврежденных конечных состояний, если возникают разные режимы нагрузки; и вектор последствий, которые определяют ожидаемые ущербы, которые соответствуют различным поврежденным конечным состояниям системы. Оценка уязвимости является ключевым элементом комплексных процедур оценки риска. Она суммирует результаты оценки сценария системы и выявляет слабые стороны системы и ее неспособность противостоять различным воздействиям и режимам нагрузки.

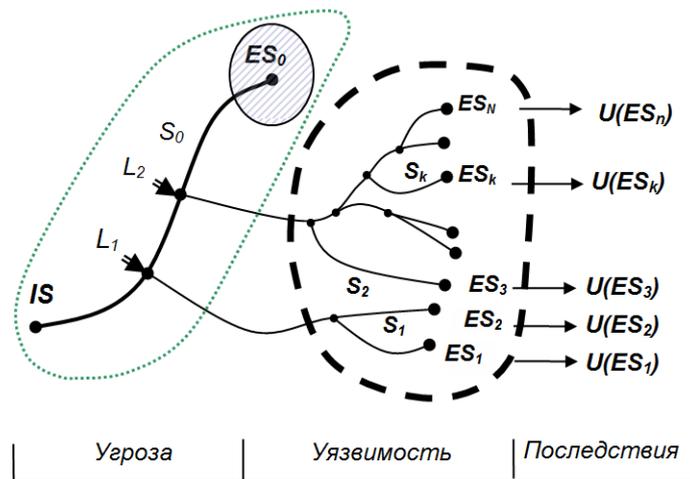


Рис. 1 Общая схема оценки рисков

НС – начальное состояние СТС;  $S_0$  – сценарий успешного выполнения системой своих функций;  $ES_0$  – заданное конечное состояние СТС,  $\varepsilon_0$  – окрестность точки  $ES_0$ , в которой конечные состояния можно считать неповрежденными;  $L_1, L_2$  – режимы нагружения,  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – сценарии отказа, реализующиеся после достижения предельных состояний;  $ES_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – поврежденные конечные состояния СТС, соответствующие сценариям  $S_i$ ;

### 3. Многоуровневая модель оценки уязвимости

Структурно сложные системы требуют более детальной оценки сценария. Такая оценка должна учитывать, что процессы накопления повреждений и разрушения развиваются на различных масштабных уровнях, варьирующихся от нано до макроуровней. Другими словами, если рассматривается структурно сложная техническая система, дерево сценариев, описывающее многовариантные процессы накопления и разрушения повреждений, должно быть многоуровневым и включать поддеревья, описывающие накопление и разрушение повреждений на уровнях материала, структурных элементов и системы в целом.

На современном уровне развития фундаментальной науки и методов технической диагностики практически возможно проанализировать процессы разрушения на четырех масштабных уровнях: (1) мезомасштабном уровне, связанном с разрушением материала, и двух макроуровневых уровня: (2) масштабный уровень структурных элементов, описывающих развитие макро-дефектов и разрушение элементов системы, (3) структурном уровне, описывающем сценарии последующих разрушений элементов, приводящих к полному разрушению системы, и (4) уровне внешней среды.

Имея это в виду, можно рассматривать уязвимость системы как ее комплексную характеристику, которое можно разделить на дифференциальные характеристики, описывающие:

- уязвимость конструкционного материала как неспособность материала сопротивляться накоплению повреждений и разрушению под напряжением;
- уязвимость элементов как неспособность структурных элементов сопротивляться развитию микродефектов и макроповреждений под нагрузкой;
- структурную уязвимость как неспособность системы выдерживать нагрузки при наличии локальных дефектов и разрушении ее элементов.

Ввиду высокого уровня неопределенности, связанного с вариативностью параметров системы (механических характеристик конструкционных материалов, геометрических размеров) и режимов нагружения, а также с ограниченностью знаний о системе, оценка уязвимости СТС должна проводиться в вероятностной постановке. С учетом многомасштабного характера процессов накопления повреждений и разрушения, сложное вероятностное событие «разрушение системы» можно рассматривать как последовательность связанных случайных событий [1,5]: (1)  $\langle L \rangle$  - система подвергается режиму нагружения; (2)  $\langle MD | L \rangle$  - возникновение повреждения материала, если система подверглась воздействию  $L$ ; (3)  $\langle LD | L, MD \rangle$  - достижение структурным элементом локального предельного состояния  $LD$  при условии, что происходят события  $L$  и  $MD$ ; (4)  $\langle F | L, MD, LD \rangle$  - разрушение системы, если происходят события  $L$ ,  $MD$  и  $LD$ . Тогда вероятность разрушения системы можно оценить как:

$$P(F) = P(L) \cdot P(MD | L) \cdot P(LD | L, MD) \cdot P(F | L, MD, LD) \quad (3)$$

где  $P(MD|L)$  – уязвимость конструкционного материала;  $P(LD | L, MD)$  - уязвимость конструктивного элемента системы,  $P(F | L, MD, LD)$  - уязвимость системы. Тогда риск в рассматриваемой системе может оценен как:

$$R = P(F) \cdot U_F = P(L) \cdot P(LD | L, MD) \cdot P(MD | L) \cdot U_F \quad (4)$$

Для структурно сложных инженерных систем, которые подвергаются множественным режимам нагружения и множественным сценариям отказов, оценка уязвимости предполагает оценку многоуровневого дерева сценариев (рис. 2). В результате действия различных термомеханических нагрузок некоторые из мезообъемов материала, расположенных

в зонах концентрации напряжений, могут быть переведены из неповрежденного в какое-то поврежденное состояние по сценарию  $s_i^{(m)}$  (рис.2а). С этой точки зрения повреждение материала может рассматриваться как исходное событие сценария отказа конструктивного элемента  $s_j^{(c)}$ , заканчивающееся разрушением конструктивного элемента. Из-за пластичности материала и его способности перераспределять нагрузки между мезообъемами это не означает немедленного разрушения всего конструктивного элемента, но запускает сценарий разрушения на уровне элемента по сценарию  $s_j^{(c)}$  (рис. 2б).

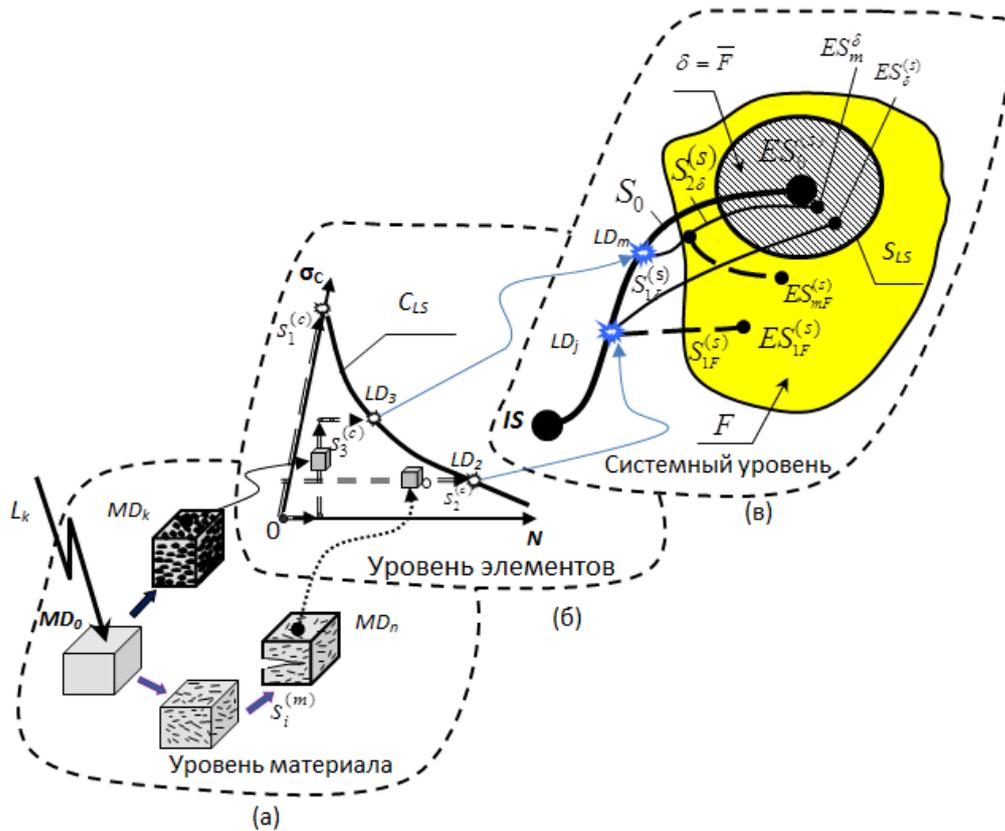


Рис. 2. Многоуровневая оценка уязвимости

$L_k$  - режим нагружения,  $MD_k$  - повреждение материала,  $s_i^{(m)}$  - сценарий накопления повреждений конструктивного материала,  $s_i^{(c)}$  - сценарий повреждения элемента,  $C_{LS}$  - функция предельного состояния конструктивного элемента,  $LD_j$  - локальное повреждение,  $F$  - область отказа системы,  $\delta = \bar{F}$  - область выживания системы,  $S_{LS}$  - функция предельных состояний системы,  $IS$  - начальное (неповрежденное) состояние системы после ее построения,  $ES_0^{(s)}$  является расчетным конечным состоянием системы,  $ES_s, F^{(s)}$  конечное состояние отказа системы,  $ES_i^{(s)}$  - конечное состояние успеха системы, расположенное в пределах области выживания  $\delta$ ,  $S_i^{(s)}$  - сценарий успеха системы,  $S_F^{(s)}$  - сценарий разрушения системы.

На макроуровне система разработана для выполнения так называемого сценария успеха  $S_0$  (то есть перехода из своего начального состояния  $IS$  в заданное конечное состояние  $ES_0^{(s)}$ ). Поскольку любой сценарий отказа  $S_m^F$  представляет собой отклонение от сценария успеха  $S_0$ , которое соответствует успешному функционированию СТС, сценарий  $S_m^F$  должен иметь точку возмущения, в которой происходит некоторое локальное повреждение. Когда структурный элемент СТС достигает локального поврежденного состояния  $LD_j$ , это не означает обязательного и мгновенного разрушения системы в целом. Ввиду нали-

чия избыточных связей и альтернативных путей передачи нагрузки, нагрузка ранее воспринимавшаяся разрушенным элементом, может быть перераспределена на оставшиеся. Это, в свою очередь, может инициировать последовательность разрушения других элементов и системы в целом (по сценарию  $S_k$ , рис. 2в). Таким образом, каждое локальное событие повреждения может привести к ответвлению дерева сценариев, которое имеет соответствующий набор сценариев  $S_i$ , заканчивающихся в конечных состояниях ( $ES_i$ ).

Результаты многоуровневой вероятностной оценки уязвимости можно описать с помощью матричного уравнения:

$$\frac{\{P(ES_0^{(s)}); \dots; P(ES_q^{(s)})\}}{\{ES^{(s)}\}} = \frac{\{P(L_1); \dots; P(L_n)\} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(MD_1 | L_1) & \dots & P(MD_m | L_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(MD_1 | L_n) & \dots & P(MD_m | L_n) \end{bmatrix}}_{[V_{Mat}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(LD_1 | MD_1) & \dots & P(LD_l | MD_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(LD_1 | MD_m) & \dots & P(LD_l | MD_m) \end{bmatrix}}_{[V_{Comp}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(ES_0^{(s)} | LD_1) & \dots & P(ES_q^{(s)} | LD_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(ES_0^{(s)} | LD_l) & \dots & P(ES_q^{(s)} | LD_l) \end{bmatrix}}_{[V_{Str}]}}{\underbrace{\{MD\}=\{P(MD_1) \dots P(MD_m)\}}_{\{LD\}=\{P(LD_1) \dots P(LD_l)\}}}_{\{ES^{(s)}\}=\{P(ES_0^{(s)}); \dots; P(ES_q^{(s)})\}} \quad (5)$$

или в краткой форме:

$$\{ES^{(s)}\} = \{L\} \cdot [V_{Mat}] \cdot [V_{Comp}] \cdot [V_{Str}] \quad (6)$$

где  $\{L\} = \{P(L_1), P(L_2), \dots, P(L_n)\}$  - вектор режимов нагружения;  $\{MD\} = \{P(MD_1), P(MD_2), \dots, P(MD_m)\}$  - вектор материальных убытков;  $\{LD\} = \{P(LD_1), P(LD_2), P(LD_l)\}$  - вектор локальных повреждений элементов;  $\{ES^{(s)}\} = \{P(ES_0^{(s)}), P(ES_1^{(s)}), \dots, P(ES_q^{(s)})\}$  - вектор конечных состояний системы;  $[V_{Mat}]$  - матрица материальной уязвимости:  $V_{Mat}(i, k) = P(MD_i | L_k)$ ;  $[V_{Comp}]$  - матрица уязвимости элемента:  $V_{Comp}(j, i) = P(LD_j | MD_i)$ ;  $[V_{Str}]$  - это матрица структурной уязвимости:  $V_{Str}(q, j) = P(ES_q^{(s)} | LD_j)$ .

$$[V_{Sys}] = [V_{Mat}] \cdot [V_{Comp}] \cdot [V_{Str}]. \quad (7)$$

Произведение матриц  $[V_{Mat}]$ ,  $[V_{Comp}]$  и  $[V_{Str}]$  называется матрицей уязвимости системы  $[V_{Sys}]$ :

$$\{ES^{(s)}\} = \{L\} \cdot [V_{Sys}]. \quad (8)$$

#### 4. Матричная оценка прямых и косвенных рисков, генерируемых сложной технической системой

Как только определены вероятности различных конечных состояний  $P(ES_0^{(s)})$ ,  $P(ES_1^{(s)})$ , ...,  $P(ES_q^{(s)})$  СТС, необходимо оценить прямые последствия, которые соответствуют каждому из конечных состояний, выраженные в стоимостном выражении  $U(ES_0^{(s)})$ ,  $U(ES_1^{(s)})$ , ...,  $U(ES_q^{(s)})$ , которые формируют вектор прямых ущербов  $\{U_{dir}\}$  обусловленных разрушением системы.

Тогда индекс прямых рисков можно оценить с помощью матричного уравнения:

$$R_{dir} = \underbrace{\{P(L_1) \dots P(L_n)\}}_{\{L\}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P[MD_1 | L_1] & \dots & P[MD_m | L_1] \\ \dots & \dots & \dots \\ P[MD_1 | L_n] & \dots & P[MD_m | L_n] \end{bmatrix}}_{[V_{Mat}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(LD_1 | MD_1) & \dots & P(LD_l | MD_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(LD_1 | MD_m) & \dots & P(LD_l | MD_m) \end{bmatrix}}_{[V_{Comp}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(ES_0^{(s)} | LD_1) & \dots & P(ES_q^{(s)} | LD_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(ES_0^{(s)} | LD_l) & \dots & P(ES_q^{(s)} | LD_l) \end{bmatrix}}_{[V_{Str}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} U(ES_0^{(s)}) \\ \dots \\ U(ES_q^{(s)}) \end{bmatrix}}_{\{U_{dir}\}} \quad (9)$$

или в краткой форме:

$$R_{dir} = \{L\} \cdot [V_{Mat}] \cdot [V_{Comp}] \cdot [V_{Str}] \cdot \{U_{dir}\}$$

Уравнения (6) или (7) дают возможность оценить математическое ожидание величины прямых экономических ущербов в результате потенциальных аварий в СТС.

Следует отметить, что выражение (6) учитывает только прямые ущербы из-за аварии в СТС и игнорирует косвенные / вторичные ущербы, которые могут быть причинены окружающей природно-техногенной среде системы (например, ущербам для сопряженных природных и/или техногенных систем). В более общей постановке каждое поврежденное конечное состояние системы  $ES_i^{(s)}$  следует рассматривать как переходное состояние или, другими словами, как исходное событие  $IE_i^{(e)}$ , которое запускает набор вторичных сценариев ( $S_0^{(e)}, S_1^{(e)}, \dots, S_p^{(e)}$ ) возмущений в окружающей (внешней) среде системы (рис. 3).

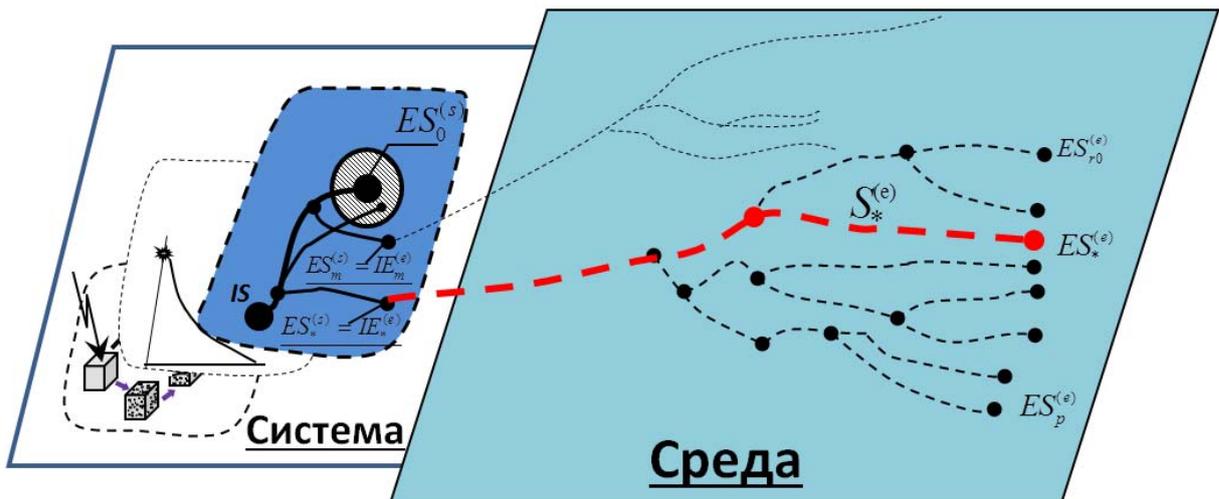


Рис. 3. Распространение аварии во внешней среде

Подобно тому, что было сделано в предыдущем параграфе, можно записать матричное уравнение, которое устанавливает соотношение между вероятностями этих промежуточных состояний ( $ES_i^{(s)} = IE_i^{(e)}$ ) и вероятностями конечных состояний сценариев распространения возмущений в окружающей среде  $ES_0^{(e)}, ES_1^{(e)}, \dots, ES_p^{(e)}$ , которые были вызваны повреждением или отказом системы.

$$\underbrace{\{P(ES_0^{(e)}); \dots; P(ES_p^{(e)})\}}_{\{ES^{(e)}\}} = \underbrace{\{P(ES_0^{(s)}); \dots; P(ES_q^{(s)})\}}_{\{ES^{(s)}\}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P[ES_0^{(e)} | ES_0^{(s)}] & \dots & P[ES_p^{(e)} | ES_0^{(s)}] \\ \dots & \dots & \dots \\ P[ES_0^{(e)} | ES_q^{(s)}] & \dots & P[ES_p^{(e)} | ES_q^{(s)}] \end{bmatrix}}_{[V^{(e)}]} \quad (10)$$

где  $\{ES^{(e)}\} = \{P(ES_0^{(e)}), P(ES_1^{(e)}), \dots, P(ES_p^{(e)})\}$  - вектор конечных состояний внешней среды,  $\{ES^{(s)}\} = \{P(ES_0^{(s)}), P(ES_1^{(s)}), \dots, P(ES_q^{(s)})\}$  - вектор конечных состояний системы,  $[V^{(e)}(i,j)] = P(ES_i^{(e)} | ES_j^{(s)})$  - матрица уязвимости окружающей среды.

Затем следует оценить косвенные ущербы, которые возникают из-за различных конечных состояний среды  $\{U^{(e)}\} = \{U_0^{(e)}, U_1^{(e)}, \dots, U_p^{(e)}\}$ , и получить оценку косвенного риска для окружающей природно-техногенной среды из-за возможных аварий в системе.

Тогда индекс косвенного риска для среды системы можно оценить как:

$$R_{ind} = \underbrace{\{P(ES_0^{(s)}); \dots; P(ES_q^{(s)})\}}_{\{ES^{(s)}\}} \times \begin{bmatrix} P[ES_0^{(e)} | ES_0^{(s)}] & \dots & P[ES_p^{(e)} | ES_0^{(s)}] \\ \dots & \dots & \dots \\ P[ES_0^{(e)} | ES_q^{(s)}] & \dots & P[ES_p^{(e)} | ES_q^{(s)}] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} U_{ind}(ES_0^{(e)}) \\ \dots \\ U_{ind}(ES_p^{(e)}) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Или в краткой форме:

$$R_{ind} = \{ES^{(s)}\} [V^{(e)}] \{U_{ind}\}.$$

Таким образом, общий экономический риск, генерируемый СТС, может быть представлен как сумма прямых и косвенных рисков:

$$R = R_{dir} + R_{ind} = \{L\} [V_{Mat}] [V_{Comp}] [V_{Str}] \{U_{dir}\} + \{ES^{(s)}\} [V^{(e)}] \{U_{ind}\}. \quad (12)$$

Предлагаемый подход основан на изучении хронологической последовательности дискретных случайных событий разрушения, происходящих на различных масштабных структурных уровнях СТС и окружающей среды. Он имеет существенные ограничения, поскольку не включает в себя конвергентные узлы, позволяющие описать реакцию системы на совместное действие двух или нескольких воздействий, а также петли обратной связи, описывающие взаимодействия начальных и вторичных процессов отказа. Однако этот подход дает возможность описать многоуровневое разрушение в вероятностной постановке и получить экспресс-оценку рисков, генерируемых сложными техническими системами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-58-48008 ИНД\_оми).

## Литература

1. Baker J.W., M. Schubert, Faber M. H. On the Assessment of Robustness, Journal of Structural Safety. - 2008, т.30, с. 253-267.
2. Starossek, U., Haberland M. Disproportionate Collapse: Terminology and Procedures. Journal of Performance of Constructed Facilities. - 2010, 24(6), с.519-528.
3. Махутов Н.А., Резников Д.О. Использование сценарного анализа для оценки прочностной надежности сложных технических систем//Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2015. № 1. С. 4-13.
4. Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести структурно-сложных силовых конструкций на основе сценариев накопления повреждений//Вестник инженерной школы ДВФУ. - 2019. № 4(41) стр. 39-54.
5. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка прочностной живучести технических систем//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2019. №4 с. 47-57.
6. Махутов Н.А., Резников Д.О., Зацаринный В.В. Два типа сценариев аварий в сложных технических системах//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2014. № 2. С. 28-41.
7. Махутов Н.А., Резников Д.О. Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения//Безопасность в техносфере. - 2016. Т. 5. №4.С. 3-17
8. Reznikov D.O. Assessment of constructional robustness of a complex technical system: A multi-level approach. AIP Conference Proceedings 2053, 040080 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5084518>. Published Online: 19 December 2018

## Сведения об авторе

**Резников Дмитрий Олегович**, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). e-mail: [imashreznikoff@yandex.ru](mailto:imashreznikoff@yandex.ru), тел. +7 (495) 623 58 35

УДК 004.853

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-05-4

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ЛЕСНЫМ ПОЖАРАМ

**Кандидат физ.-мат. наук Л.Р. Борисова**  
Финансовый университет при Правительстве РФ, Московский физико-технический институт (государственный университет)

**Доктор сельхоз. наук, кандидат техн. наук Ю.В. Подрезов**  
ФБГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)  
Московский физико-технический институт

**Кандидат биолог. наук А.В. Кузнецова**  
Институт Биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН

**З.В. Тимошенко**  
ВИНИТИ РАН