

РОЗДІЛ «БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ»

УДК 519.873:504.06

ДРАНИШНИКОВ Л.В., д.т.н., професор
СТОЕЦКИЙ В.Ф.*, соискательДнепродзержинский государственный технический университет
*Национальный горный университет, г. Днепропетровск

АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Введение. Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, внешние воздействия, разрушение, выброс, воспламенение, взрыв, и т.д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа. При выборе и применении методов анализа риска рекомендуется придерживаться следующих требований [1]: метод должен быть научно обоснован и соответствовать рассматриваемым опасностям; метод должен давать результаты в виде, позволяющем лучше понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска; метод должен быть повторяемым и проверяемым. Оценка степени риска поражения людей и нанесения ущерба при авариях связаны с задачей прогнозирования показателей надежности и остаточного ресурса функционирующей системы.

Отметим, что **повышение уровня безопасности (снижение аварийности) производств** в общем случае может происходить по трем направлениям:

- 1) *снижение вероятности возникновения аварии*; ее уровень зависит от надежности технологического оборудования, степени контролируемости производственного процесса и эффективности управления им, квалификации и профессионализма работников;
- 2) *уменьшение силы аварийного события* (размеров и направлений распространения воздействия энергии) в окружающем пространстве;
- 3) *уменьшение масштабов поражения*.

Постановка задачи. Одним из способов повышения безопасности систем является метод резервирования, заключающийся во введении в систему дополнительных элементов или подсистем сверх количества, минимально необходимого для выполнения заданных функций.

Задачей исследования является повышение надежности систем за счет резервирования.

Простейший способ резервирования показан на рис.1, в. Предполагается, что аварийные отказы элементов – независимые события, а отказ системы происходит в том случае, если откажут все n элементов. Функция безопасности системы $S(t)$ в этом случае будет равна:

$$S(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - S_k(t)]. \quad (1)$$

При высказанных предположениях о независимости отказов элементов (что не всегда имеет место) безопасность системы с параллельным соединением элементов возрастает с увеличением кратности резервирования. Так уже при однократном резервировании (дублировании) в случае, когда вероятность безаварийной работы элемента $S_0 = 0,99$, для системы получаем $S = 0,9999$. Средний ресурс системы возрастает в 1,5 раза.

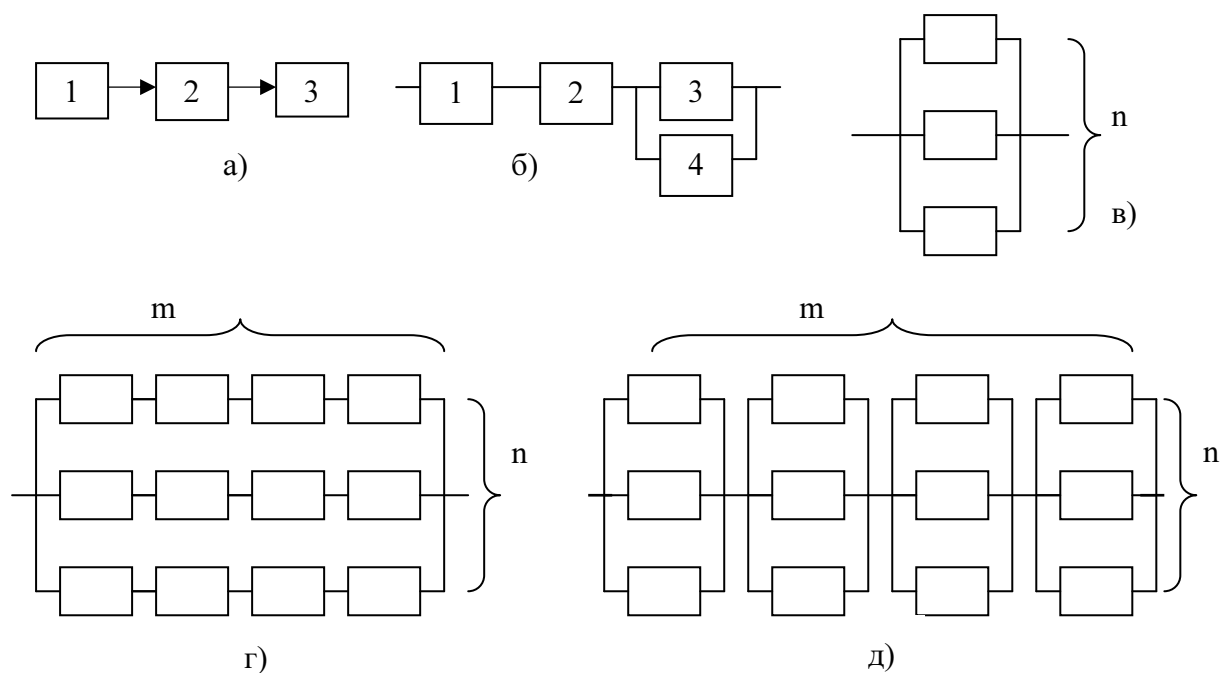


Рисунок 1 – Структурные схемы простейших систем при расчете технического риска

Наряду с этими случаями можно строить схемы, в которых резервные элементы включаются в работу только в случае отказа очередного элемента или резервные элементы работают в облегченном дежурном режиме.

Как правило, при построении дерева отказов допускается статистическая независимость базовых событий. Взаимозависимые базовые события на дереве отказов могут быть в таких случаях:

1. Резервирование замещением. Включение в состав системы элементов оборудования, которые резервируют основное оборудование, направлено на повышение вероятности безотказной работы системы и ее коэффициента готовности.

2. Общие причины. Общая причина, такая как, например, пожар, может привести к одновременному отказу большого количества элементов.

3. Параллельная нагрузка компонентов. Предположим, что некоторая группа компонентов системы совместно противостоит действию некоторой нагрузки, такой как, например, ударное воздействие. В этом случае отказ одного из элементов этой группы приводит к повышению нагрузки на другие элементы так, что они, в свою очередь, становятся в большей мере склонны к отказам.

4. Взаимоисключающие базовые события.

Рассмотрим зависимости между базовыми событиями введением в систему резервирования замещением и действием общих причин. Системы при взаимозависимости базовых событий, вызванных другими факторами, исследуют аналогично. Дерево ошибок, изображенное на рис.2, содержит пять минимальных сечений (минимальным аварийным сечением называют наименьший набор исходных событий, при котором возникает событие в вершине – неблагоприятное событие – авария):

$$d_1 = \{C\}, d_2 = \{E\}, d_3 = \{H\}, d_4 = \{A, B\}, d_5 = \{F, G\}.$$

Главное событие может быть выражено через события d_i :
$$S = \bigcup_{i=1}^{N_c} d_i,$$

где N_c – общее число минимальных сечений.

Отказ $Q_s(t)$ системы через число минимальных сечений можно вычислить по выражению [1]:

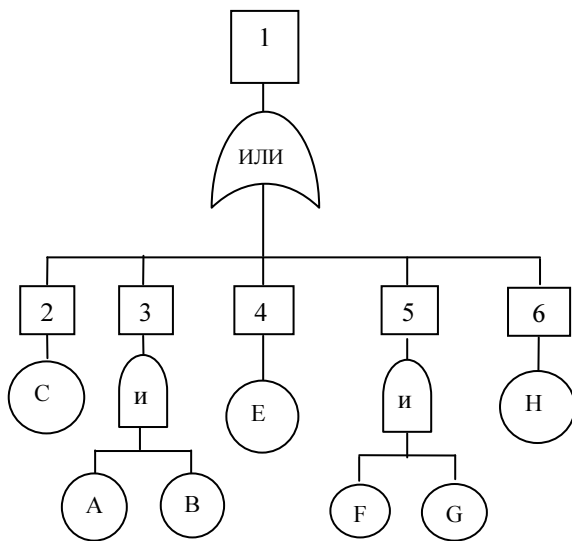
$$Q_s(t) = \sum_{i=1}^{N_c} Pr(d_i) - \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{j=1}^{i-1} Pr(d_i \cap d_j) + \dots + (-1)^{N_c-1} Pr(d_1 \cap d_2 \cap \dots \cap d_{N_c}). \quad (2)$$

Простейший расчет верхней и нижней границы отказа производится как [1]:

$$\sum_{i=1}^{N_c} Pr(d_i) - \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{j=1}^{i-1} Pr(d_i \cap d_j) \leq Q_s(t) \leq \sum_{i=1}^{N_c} Pr(d_i), \quad (3)$$

нижняя граница верхняя граница

где $Q_s(t)$ – отказ системы; N_n – общее число минимальных сечений d_i .



1 – отказ системы; 2 – отказ компрессора; 3 – отказ системы насосов охлаждающего устройства; 4 – отказ насоса подачи воды; 5 – отказ системы насосов, которые обеспечивают циркуляцию паров в газоочистной колонне; 6 – отказ фильтра

Рисунок 2 – Дерево ошибок для системы охлаждения и очистки попутного газа

Рассмотрим систему, содержащую элементы А и В (например насосы), один из которых находится в резерве, а второй, который является основным, работает.

Предположим, что в некоторый момент времени t элемент А работает, а элемент В находится в резерве. В случае наступления отказа элемента А вместо него включается в работу элемент В, который находился в резерве, так, что система в целом сохраняет работоспособность. Элемент А, который отказал, ремонтируется и по окончании ремонта переводится в резерв. Введение в систему дополнительных элементов по такой схеме повышает безотказность системы в целом. При введении в систему резервирования замещением каждый элемент может находиться в одном из трех состояний: *в резерве, в ремонте* или *в работе*. В зависимости от характеристик отказа компонентов, находящихся в разных состояниях, резервирование замещением делится на такие три типа:

1 – *нагруженное резервирование*: интенсивность отказов компонента не зависит от того, находится компонент в работе или в резерве;

2 – *ненагруженное резервирование*: допускается, что отказ компонента не может наступить, если соответствующий компонент находится в резерве. Отказ основного компонента приводит к переводу резервного компонента из резерва в работу, т.е. к скачкообразному изменению интенсивности отказов, связанной с соответствующим компонентом;

3 – *частичная нагрузка резервирования*: допускается, что компонент, который находится в резерве, также может отказаться, но интенсивность отказов компонента при нахождении его в резерве более низкая, чем когда он находится в работе.

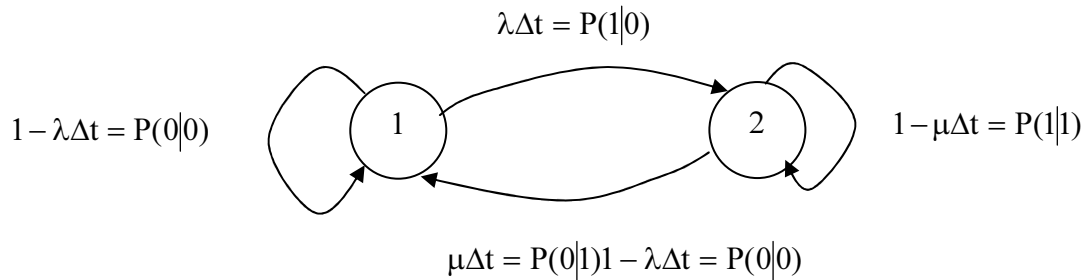
Результаты работы. Рассмотрим метод Марковских процессов для анализа систем с постоянными интенсивностями отказов (рис.3) и восстановлений (λ – условная интенсивность потока отказов, μ – условная интенсивность потока восстановлений).

Пусть $x(t) = 1$, если компонент находится в неработоспособном состоянии, а $x(t) = 0$, если компонент находится в работоспособном состоянии.

Для определения условной интенсивности потока отказов λ можно применить следующую систему выражений (рис.3):

$$\begin{aligned} P(1|0) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 0] = \lambda \Delta t; \\ P(0|0) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 0 | x(t) = 0] = 1 - \lambda \Delta t; \\ P(1|1) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 1] = 1 - \mu \Delta t; \\ P(0|1) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 0 | x(t) = 1] = \mu \Delta t, \end{aligned}$$

где $\Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 0]$ – вероятность того, что отказ совершится на протяжении интервала времени $t + \Delta t$ при условии, что компонент работоспособен в момент времени t и т.д. Величины $P(1|0), P(0|0), P(0|1)$ называются переходными вероятностями.



1 – работоспособное состояние; 2 – неработоспособное состояние

Рисунок 3 – Марковский граф состояний

Вероятностью отказа системы является вероятность того, что $x(t + \Delta t) = 1$. Эту вероятность, в свою очередь, можно выразить в терминах двух возможных состояний $x(t)$ и соответствующих переходов к состоянию $x(t + \Delta t) = 1$:

$$\begin{aligned} Q(t + \Delta t) &= \Pr[x(t + \Delta t) = 1] = P(1|0) \cdot \Pr[x(t) = 0] + P(1|1) \cdot \Pr[x(t) = 1] = \\ &= \lambda \cdot \Delta t [1 - Q(t)] + (1 - \mu \cdot \Delta t) \cdot Q(t). \end{aligned}$$

Последнее уравнение можно переписать в виде:

$$Q(t + \Delta t) = \lambda \cdot \Delta t - \lambda \cdot \Delta t \cdot Q(t) + Q(t) - \mu \cdot \Delta t \cdot Q(t).$$

Откуда находим:

$$\frac{dQ}{dt} = -(\lambda + \mu) \cdot Q(t) + \lambda, \quad Q(0) = 0. \tag{4}$$

Решением последнего является:

$$Q(p) = \frac{\lambda}{p + (\lambda + \mu)} - \frac{\lambda}{p + (\lambda + \mu)} \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]. \tag{5}$$

Рис.4 отображает поведение системы (введение в систему дополнительных элементов сверх количества, минимально необходимого), которая состоит из элементов А

и В. В случае частично нагруженного или нагруженного резервирования допускается, что отказы резервных компонентов характеризуются постоянной интенсивностью $\bar{\lambda}$. При нагруженном резервировании $\bar{\lambda}$ считают такой, что равняется λ - интенсивности отказов основного компонента. При ненагруженном резервировании $\bar{\lambda}$ равна нулю. Особыми случаями частично нагруженного резервирования ($0 < \bar{\lambda} < \lambda$) является ненагруженное резервирование ($\bar{\lambda} = 0$) и нагруженное резервирование ($\bar{\lambda} = \lambda$).

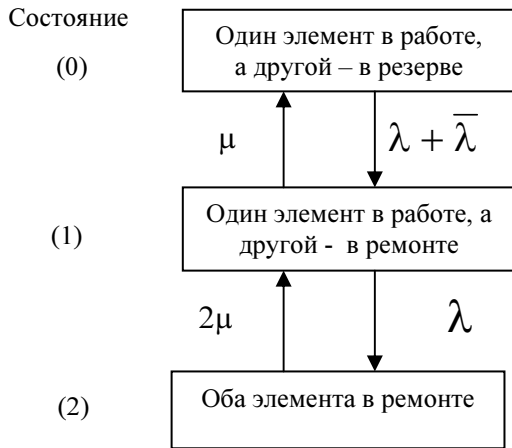


Рисунок 4 – Упрощенный Марковский граф переходов при резервировании системы для двух элементов

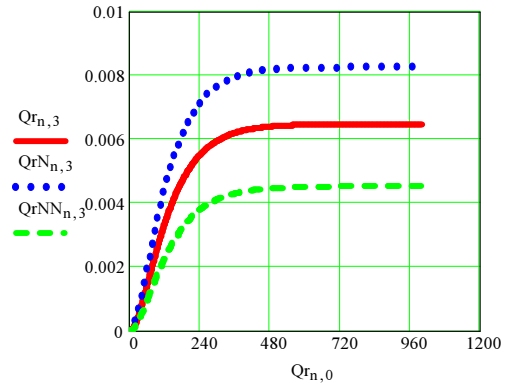


Рисунок 5 – Зависимости вероятностей отказа элементов А и В от времени

Система дифференциальных уравнений (6) описывает систему, граф переходов которой содержит три состояния: (0), (1) и (2)

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -(\lambda + \bar{\lambda})P_0 + \mu P_1; \\ \frac{dP_1}{dt} &= (\lambda + \bar{\lambda})P_0 - (\lambda + \mu)P_1 + 2\mu P_2; \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda P_1 - 2\mu P_2 \end{aligned} \tag{6}$$

с начальными условиями $P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) = 0$.

Интенсивность потока переходов, который выходит из состояния (0), равняется $\lambda + \bar{\lambda}$, а интенсивность входного потока – μ . На рис.5 показаны зависимости вероятности отказа элементов $\{A, B\}$ ($Qr(t) = Pr(A \cap B)$) от времени, численно равные вероятности того, что оба компонента А и В находятся в ремонте (кривая Qr – частично нагруженное резервирование; кривая QrN – нагруженное состояние; кривая $QrNN$ – ненагруженное резервирование). Анализ результатов численного решения системы (5) показывает ($Qr(t) = P_2(t)$), что при нагруженном резервировании вероятность отказа выше, чем при частично нагруженном, а при частично нагруженном – выше, чем при ненагруженном резервировании. Вычислим вероятность отказа системы в целом: примем интенсивности отказов $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \bar{\lambda} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ (частично нагруженное резервирование), $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \bar{\lambda} = 0; \mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ (ненагруженное резервирование). Численное решение задачи (5) дает следующие значения вероятностей отказа:

t	100	500	1000
$Qr(t)$	0,0028024	0,0064155	0,006479
$QrNN(t)$	0.0018982	0,0044707	0,0045245
$Q(t)$	0,0062948	0,0098375	0,0099006
$Q_s(t)_{max}$	0,023585	0,040399	0,40705
$Q_s(t)_{min}$	0,023372	0,039758	0,040055

Вероятности отказов для компрессора С, насоса Е и фильтра Н вычисляются по уравнению (4). Вероятность отказа системы в целом вычисляется как:

верхняя граница отказа

$$Q_s(t)_{max} = 3 \cdot Q(t) + Qr(t) + QrNN(t),$$

нижняя граница отказа

$$Q_s(t)_{min} = Q_s(t)_{max} - 3 \cdot Q(t)^2 - 3 \cdot Q(t) \cdot Qr(t) - 3 \cdot Q(t) \cdot QrNN(t) - Qr(t) \cdot QrNN(t).$$

Поведение двухкомпонентной параллельной системы описывается графом переходов, приведенным на рис.6. Так как нас интересует только поведение системы на интервале времени до первого отказа системы (отказ системы наступает, если она достигает состояния (0,1) или состояния (1,0)), переходы из состояния (1,1), которое отвечает отказу системы, можно исключить из рассмотрения.

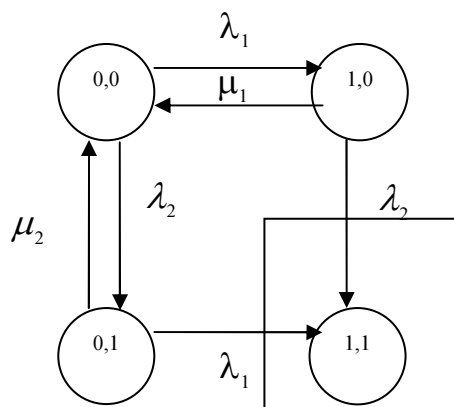


Рисунок 6 – Граф переходов для двухкомпонентной параллельной системы, используемый при определении вероятности ее безотказной работы

риваемой системы равняется сумме вероятностей пребывания системы в каждом из указанных трех состояний:

$$S(t) = P_{0,0}(t) + P_{1,0}(t) + P_{0,1}(t).$$

Вероятность отказа системы $R(t)$ определяется как:

$$R(t) = 1 - [P_{0,0}(t) + P_{1,0}(t) + P_{0,1}(t)] \tag{8}$$

Если допустить, что $\frac{1}{\lambda_1} \gg \frac{1}{\mu_1}, \frac{1}{\lambda_2} \gg \frac{1}{\mu_2}$, то из этого допущения вытекает, что

более вероятным есть переход из состояния (1,0) в состояние (0,0), чем в состояние (1,1), поэтому последним переходом можно пренебречь. Аналогично переход из со-

Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний на графе переходов (рис.6) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{0,0}}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{0,0} + \mu_1 P_{1,0} + \mu_2 P_{0,1}; \\ \frac{dP_{1,0}}{dt} &= \lambda_1 P_{0,0} - (\mu_1 + \lambda_2)P_{1,0}; \\ \frac{dP_{0,1}}{dt} &= \lambda_2 P_{0,0} - (\mu_2 + \lambda_1)P_{0,1}; \\ \frac{dP_{1,1}}{dt} &= \lambda_2 P_{1,0} + \lambda_1 P_{0,1} \end{aligned} \tag{7}$$

при следующих начальных условиях:

$$P_{0,0}(0) = 1; P_{1,0}(0) = P_{0,1}(0) = P_{1,1}(0) = 0.$$

Рассматриваемая система работоспособна до тех пор, пока она находится в одном из трех состояний: (0,0), (0,1), (1,0). Таким образом, вероятность безотказной работы рассматриваемой системы равняется сумме вероятностей пребывания системы в каждом из указанных трех состояний:

стояння (0,1) в состояние (0,0) более вероятно, чем переход из состояния (0,1) в состояние (1,1). Если на графе, приведенном на рис.6, исключить указанные два перехода, то в результате придем к упрощенному графу переходов, которому отвечает следующая система дифференциальных уравнений относительно вероятностей состояний:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{0,0}}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{0,0} + \mu_1 P_{1,0} + \mu_2 P_{0,1}; \\ \frac{dP_{1,0}}{dt} &= \lambda_1 P_{0,0} - \mu_1 P_{1,0}; \\ \frac{dP_{0,1}}{dt} &= \lambda_2 P_{0,0} - \mu_2 P_{0,1}, \end{aligned} \quad (9)$$

которая является приближенным вариантом первых трех уравнений системы (9).

Сумма вероятностей всех состояний равняется единице, т.е.

$$P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} = 1. \quad (10)$$

Примем некоторую оценку временного интервала, на протяжении которого каждый из компонентов сохраняет довольно высокую вероятность безотказной работы. Тогда вероятности P_{10}, P_{01}, P_{11} станут существенным образом меньше вероятности P_{00} . Поэтому равенство (10) можно заменить двумя приближенными равенствами:

$$\begin{aligned} P_{00} + P_{10} &= 1 \\ P_{00} + P_{01} &= 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Выразив P_{00} через P_{10} и подставив во второе уравнение системы (9), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP_{10}}{dt} = \lambda_1 - (\lambda_1 + \mu_1)P_{10},$$

решением которого является:

$$P_{10}(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \{1 - \exp[-(\lambda_1 + \mu_1)t]\}. \quad (12)$$

Выразив P_{00} через P_{01} и подставив в третье уравнение системы (9), получим решение:

$$P_{01}(t) = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \{1 - \exp[-(\lambda_2 + \mu_2)t]\}. \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) аппроксимируют точные значения P_{10} и P_{01} , которые получаются решением системы дифференциальных уравнений (9).

Вероятность $Pr(K_i = 1)$ равна вероятности пребывания системы в состоянии (1,1) и отвечает отказу, который определяется этим сечением отказов. Эту вероятность можно определить как:

$$Pr(K_i = 1) = \int_0^t [\lambda_2 P_{10}(u) + \lambda_1 P_{01}(u)] du. \quad (14)$$

Подставляя (11) и (12) в (13) и интегрируя, получим следующее выражение для расчета приближенного значения вероятности отказа, который определяется некоторым сечением отказов:

$$Pr(K_i = 1) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_1} \left[t + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t} - \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1} \right] + \frac{\lambda_1 \mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \left[t + \frac{1}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t} - \frac{1}{\lambda_2 + \mu_2} \right]. \quad (15)$$

Если K_i является сечением отказов одного события, то соответствующая вероятность определяется как

$$Pr(K_i = 1) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

Если K_i является сечением отказов двух событий, то вероятность $Pr(K_i = 1)$ определяется численным решением системы дифференциальных уравнений (9), которая строится на основе графа переходов, изображенного на рис.6. Для приближенной оценки верхней границы вероятности отказа можно воспользоваться выражением

$$Q_s(t)_{max} = \text{первое приближение} = \sum_{i=1}^n Pr(K_i = 1),$$

для чего необходимо использовать выражение для сечений с одним событием и выражение (15) для сечений с двумя событиями. Отказы, определяемые сечениями, которые содержат три или больше событий, наступают довольно редко, так что взнос их в вероятность отказа системы является несущественным по сравнению со взносом сечений для одного или двух событий.

Выводы. Проведен анализ техногенного риска с использованием Марковской модели для резервирования. Анализ результатов численного решения системы уравнений показал, что при нагруженном резервировании вероятность отказа выше, чем при частично нагруженном, а при частично нагруженном – выше, чем при ненагруженном резервировании. Введение в систему дополнительных элементов приведет к уменьшению вероятности возникновения аварийной ситуации и, следовательно, повышению безопасности объекта (снижению аварийности).

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.Дж.Хенли. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж.Хенли, Х.Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528с.
2. Дранишников Л.В. Оценка риска возникновения аварии / Дранишников Л.В., Найверт Л.И. // Науковий вісник УкрНДІПБ: наук. журнал. – К.:УкрНДІПБ МНС України, 2004. – №2(10). – С.31-41.
3. Теоретические основы техногенной и экологической безопасности. Часть 2. Методы анализа и оценки риска аварий / Дранишников Л.В., Матвеев Ю.Н., Палюх Б.В., Богатиков В.Н. – Тверь: ТвГТУ, 2013. – 165с.

Поступила в редколлегию 25.06.2013.

УДК 65.015.11

ЛЕВЧУК К.О., к.е.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕЯКИХ ЕРГОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАТОРІВ

Вступ. Протягом тривалого часу функції людини стосовно техніки залишались в основному енергетичними, тобто для керування технікою людина користувалась своєю м'язовою силою. Ця праця характеризується складними руховими процесами, які вимагають значних затрат фізичної сили, високої координації рухів, спритності. Узгодження людини з технікою зводилось лише до врахування анатомічних та фізіологічних особливостей.

Операторська діяльність значно змінила працю людини. Перед оператором постає завдання керувати все більшою кількістю об'єктів та параметрів і тому збільшується