

## 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.

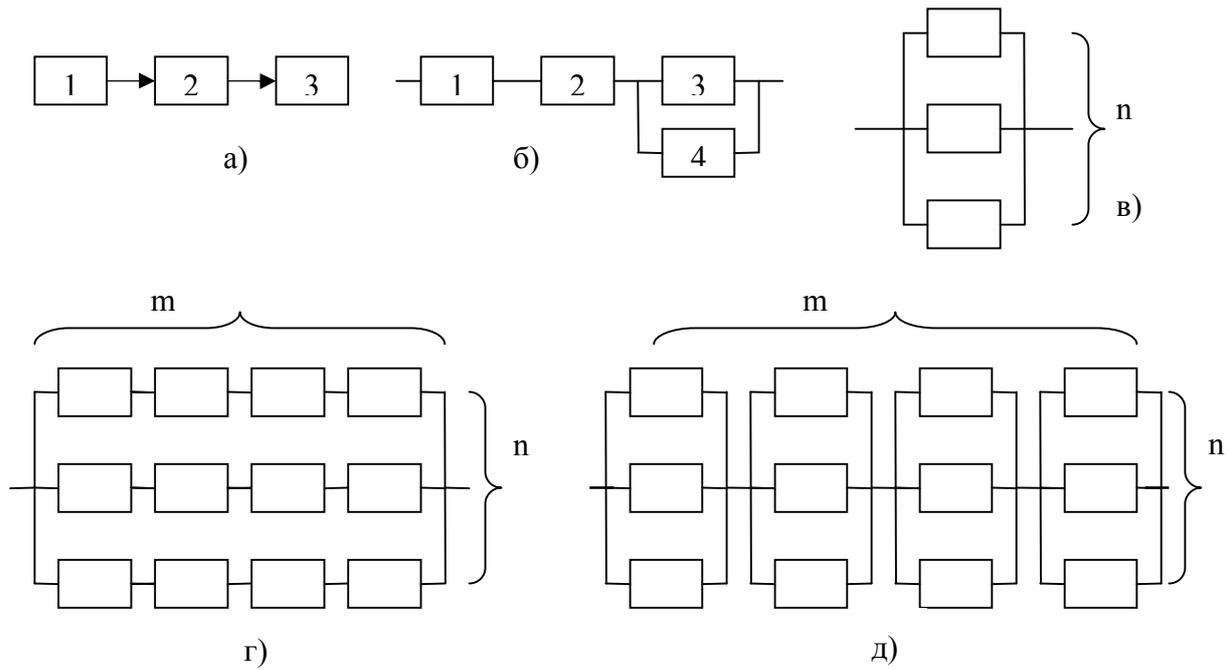


Рисунок 1 – Структурные схемы простейших систем при расчете технического риска

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.

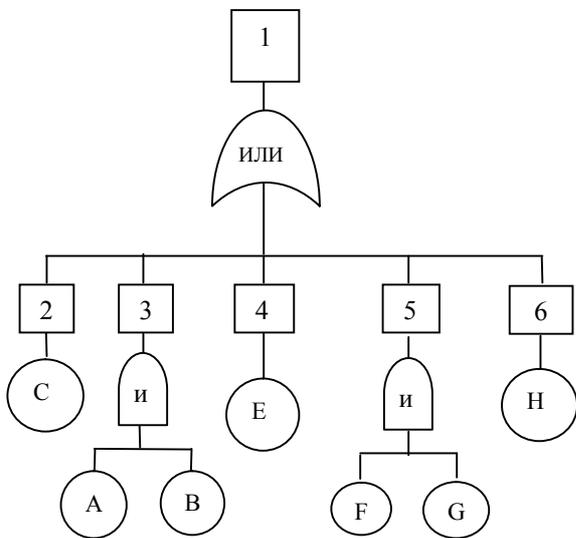
Отказ  $Q_s(t)$  системы через число минимальных сечений можно вычислить по выражению [1]:

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

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

$$\begin{matrix} \text{нижняя граница} & & \text{верхняя граница} \\ \sum_{i=1}^{N_c} Pr(d_i) - \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{j=1}^{i-1} Pr(d_i \cap d_j) \leq Q_s(t) \leq \sum_{i=1}^{N_c} Pr(d_i), \end{matrix} \quad (3)$$

где  $Q_s(t)$  – отказ системы;  $N_{\bar{n}}$  – 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.

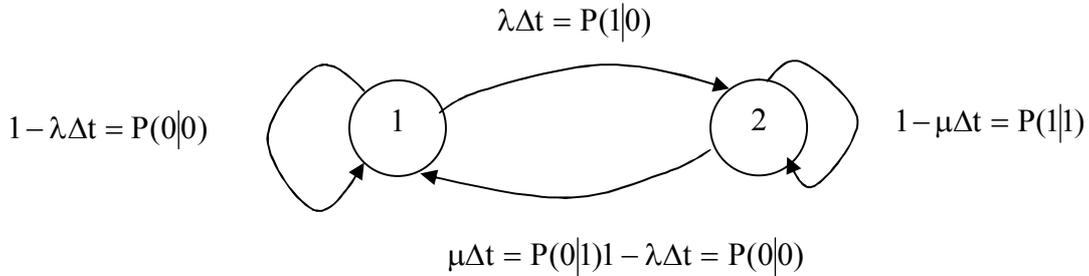
**Результаты работы.** Рассмотрим метод Марковских процессов для анализа систем с постоянными интенсивностями отказов (рис.3) и восстановлений ( $\lambda$  – условная интенсивность потока отказов,  $\mu$  – условная интенсивность потока восстановлений).

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  $\lambda$  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:

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

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  $\lambda$  - 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 ( $\bar{\lambda} = \lambda$ ).

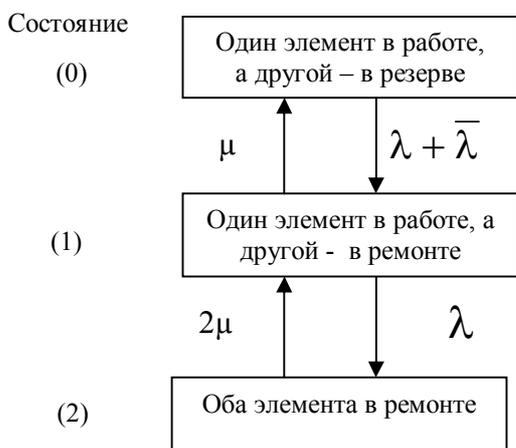


Рисунок 4 – Упрощенный Марковский граф переходов при резервировании системы для двух элементов

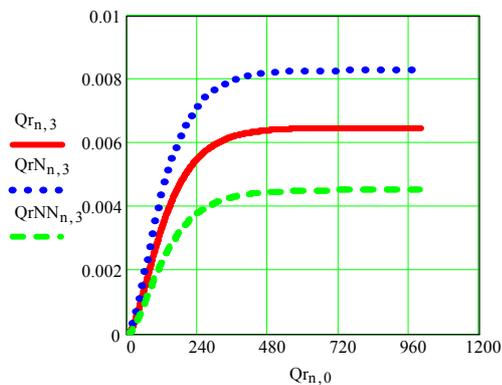


Рисунок 5 – Зависимости вероятностей отказа элементов А и В от времени

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

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

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 –  $\mu$ . 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.

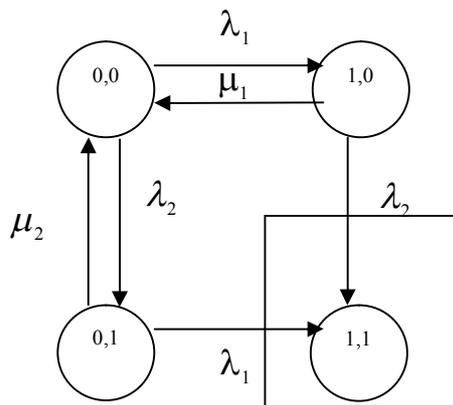


Рисунок 6 – Граф переходов для двухкомпонентной параллельной системы, используемый при определении вероятности ее безотказной работы

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:

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

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:

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

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 вероятен, 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 УкрНДПБ: наук. журнал. – К.:УкрНДПБ 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

ся напруга у праці. Людина має справу не з прямим спостереженням, а з інформаційним відображенням. Зростають вимоги до точності, швидкості та надійності дій людини, до швидкості психологічних процесів. Трудова діяльність супроводжується значними витратами нервово-емоційної та розумової енергій.

Комп'ютеризація та роботизація, з одного боку, розширили можливості людини, а з іншого – значним чином змінили вимоги до її діяльності. Відпадає необхідність у деяких видах діяльності з використанням примітивної праці по виконанню монотонних фізичних операцій, з шаблонною розумовою діяльністю. Ускладнилась проблема узгодження умов праці, конструкції машин з психологічними та фізіологічними можливостями людини. Людина стала невід'ємною і найважливішою складовою частиною системи «людина-машина-середовище» (ЛМС).

Для того, щоб керувати технологічним процесом, спостерігати та контролювати роботу, оператору необхідні дані, котрі характеризують як хід процесу, так і відповідні органи керування. При керуванні процесом оператору доводиться переробляти великий обсяг інформації. При цьому він зазнає нервового перенапруження. Для розв'язання проблем психологічного характеру конструктори намагаються пристосувати машину до людини так, щоб забезпечити найсприятливіший режим роботи.

Всі зміни керованого об'єкта фіксуються за допомогою датчиків. Сигнали від датчиків перетворюються і подаються до приладів, за якими спостерігає людина. Вона сприймає показання приладів, розшифровує їх, приймає рішення, виконує відповідні дії. Сигнал, що виникає внаслідок дій людини, перетворюється і надходить до керованого об'єкта, змінюючи його стан.

Для технологічних процесів у багатьох галузях загальний операційний час є критичним для успішного виконання задач. Окрім того, дані досліджень часу реакції операторів на виробничі чинники (подразники) можуть бути використані з метою професійного відбору, оскільки вони дозволяють виявити людей з уповільненою реакцією, яких не можна допускати до виконання операцій, коли швидкість реакції оператора може бути вирішальною.

**Постановка задачі.** Дослідити вплив інтенсивності звукового та світлового сигналів на час реакції оператора та побудувати його математичну модель.

**Результати роботи.** Під терміном «час реакції оператора» необхідно розуміти проміжок часу між початком дії, викликаного сигналом, що позбуджує до дії, та моментом закінчення дії.

Спрощена структурна схема такої системи наведена на рис. 1.

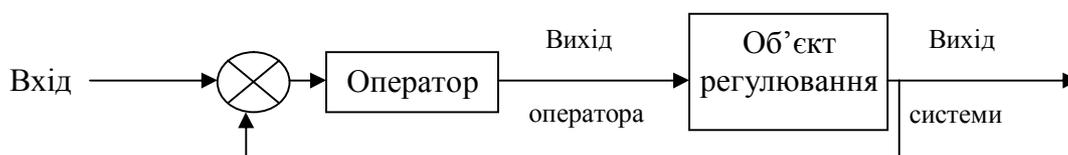


Рисунок 1 – Структурна схема «оператор-машина»

Для такої схеми виявилось можливим характеризувати діяльність оператора квазілінійною ланкою з передатною функцією:

$$W_0 = \frac{k_0 I^{-p\tau_0} (T_{01} + 1)}{(T_{01}p + 1)(T_{03} + 1)}, \quad (1)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт підсилення оператора;

$l^{-P\tau_0}$  – передатна функція ланки, що характеризує запізнювання реакції оператора від моменту появи сигналу до моменту його інтерпретації центральним аналізатором;  
 $(T_{01}p+1)$  – передатна функція ланки, що характеризує спроможність оператора випереджати сигнал для компенсації своєї інертності;  
 $(T_{02}p+1)$  – передатна функція ланки, що характеризує інертність нервового тракту оператора і проходження імпульсу порушення по нервовому тракту;  
 $(T_{03}p+1)$  – передатна функція ланки, що характеризує інертність м'язового тракту оператора.

Аналізованій функції відповідає структурна схема моделі оператора, наведена на рис.2.

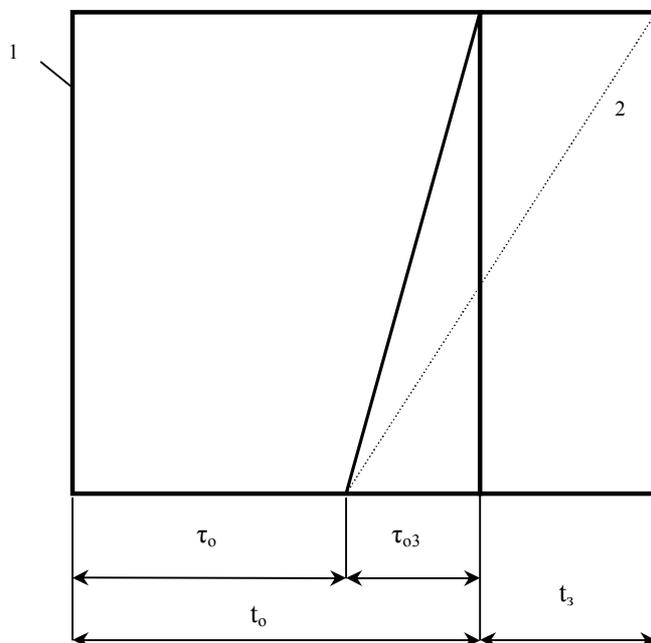


Рисунок 2 – Структурна схема моделі оператора

Звичайно  $T_{02} \ll T_{03}$ , і для простішого випадку (відключення тумблера) складову можна не враховувати. Тоді передатна функція оператора буде мати вигляд:

$$W_0 = \frac{k_0 l^{-P\tau_0}}{T_{03}p + 1} \quad (2)$$

На підставі виразу (2) можна зобразити якісну картину формування реакції так, як це показано на рис.3.



1 – вхідний сигнал; 2 – вихідний сигнал;  
 $t_0$  – момент подачі сигналу;  
 $t_3$  – час реакції оператора

Рисунок 3 – Реакція оператора

З рис.3 випливає, що час реакції оператора може бути записаний з точністю до 5%:

$$t_3 = \tau_0 + 3T_{03} \quad (3)$$

В свою чергу час  $\tau_0$  можна представити у вигляді суми

$$\tau_0 = t_b + t_p \quad (4)$$

де  $t_b$  – час, необхідний оператору, щоб сприйняти сигнал (час на сприйняття), с;

$t_p$  – час на прийняття рішення, с.

Позначивши другим доданок формули (3) через  $t_g = 3T_{03}$ , отримаємо:

$$t_3 = t_b + t_p + t_g \quad (5)$$

де  $t_g$  – час, необхідний для виконання дії, с.

Розглянемо кожну із складових часу  $t_3$ .

Час на сприйняття сигнала

лу  $t_b$  залежить від визначеного органу почуттів, на який впливає сигнал, а також від інтенсивності сигналу. Так, для простої реакції (вмикання, відключення тумблера) при достатній інтенсивності сигналу усереднений час складає для відчуття 0,15 с, дотику – 0,16 с і зору – 0,2 с.

Якісна картина впливу інтенсивності звукового сигналу на час реакції наведена в табл.1 і на рис.4; вплив інтенсивності світлового сигналу на час реакції оператора – відповідно в табл.2 та на рис.5. Отже, з рис.5 випливає, що чим більша інтенсивність сигналу, тим коротший (до визначених меж) час реакції.

Таблиця 1 – Вплив інтенсивності звукового сигналу на час реакції оператора

Інтенсивність сигналу, $I_3$ , дБА	9,5	12,3	21,8	35,3	65	80
Час реакції оператора, $t_3$ , с	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05

Час на прийняття рішення  $t_p$  значно змінюється в залежності від складності майбутнього рішення. Час на прийняття рішення пропорційний логарифму числа оцінюваних можливостей рішення  $B_p$ , тобто

$$t_p = \lg B_p. \tag{6}$$

На рис.4 наведено дані по вимірюванню часу реакції оператора на звуковий сигнал та результати їх математичної обробки. Методом найменших квадратів отримано наступні коефіцієнти рівняння залежності часу реакції оператора від інтенсивності звукового сигналу:

$$t_r = 0,04 + 0,5 \exp(-0,04(I_3 - 6)). \tag{7}$$

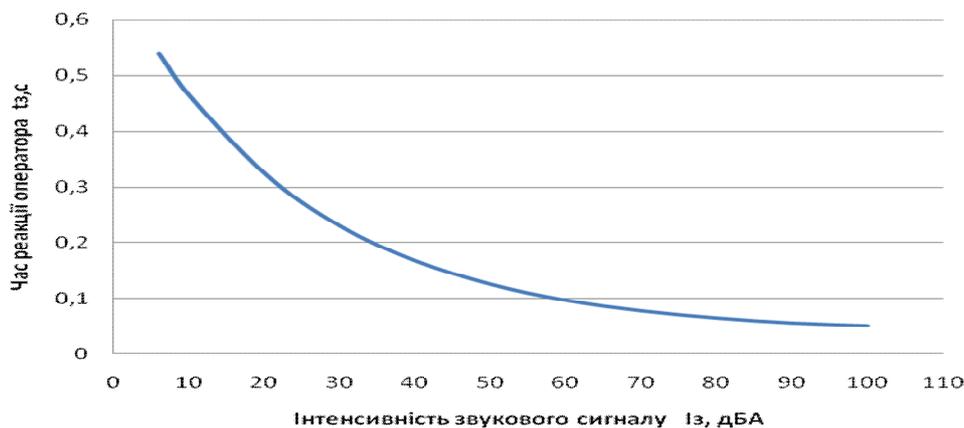


Рисунок 4 – Якісна картина впливу інтенсивності звукового сигналу на час реакції оператора

Час, необхідний для виконання дії  $t_g$ , залежить від складності дії, наприклад, від зусилля, дистанції, переміщення, необхідної точності, а також від тієї частини тіла, що бере участь у цій дії. Для дуже простих дій (наприклад, переключення тумблера) потрібен час близько 0,1 с.

Таблиця 2 – Вплив інтенсивності світлового сигналу на час реакції оператора

Інтенсивність світлового сигналу, $I_c$ , лк	39	65	82	99	120	157	217
Час реакції оператора, $t_c$ , с	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,03	0,01

На рис.5 наведено результати вимірювань та їх математичної обробки по вивченню часу реакції оператора на світлові сигнали різної інтенсивності. Коефіцієнти рівняння залежності часу реакції оператора від інтенсивності світлового сигналу мають вигляд:

$$t_r = 0,01 + 0,35 \exp(-0,02(I_c - 30)). \quad (8)$$

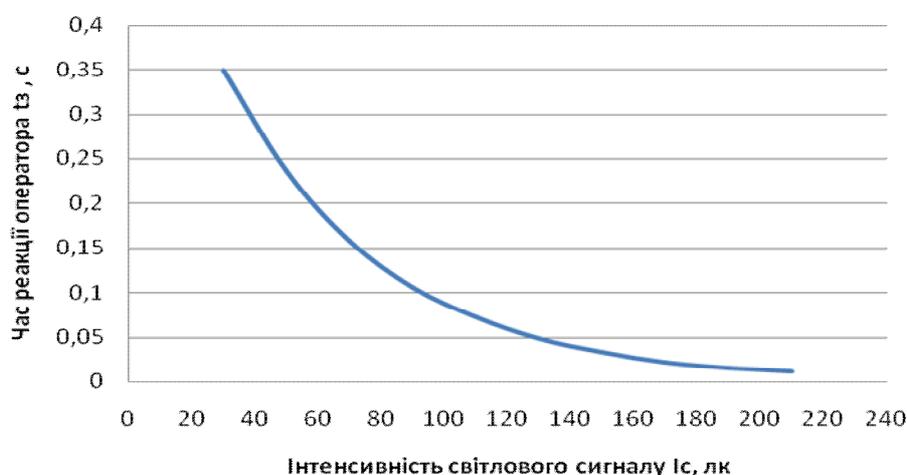


Рисунок 5 – Якісна картина впливу інтенсивності світлового сигналу на час реакції оператора

**Висновки.** Аналізатори людини функціонують в умовах складної взаємодії. На кожен аналізатор людини діють одночасно декілька подразників, які впливають взагалі на всю систему аналізаторів. Тому необхідно враховувати не лише можливості аналізатора, але і умови, в котрих перебуває людина. Відомо, що надмірний шум змінює чутливість зору. Чутливість зорового апарата знижується під дією деяких запахів, температури, вібрації. Визначаючи оптимальні умови функціонування, слід враховувати всю систему подразників, що діють на аналізатори людини, комплексно враховувати чинники навколишнього середовища (запиленість, загазованість, надлишкові теплові випромінювання, шум, вібрація та ін.)

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Основи охорони праці: підручник / [Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. та ін.]. – 2-ге вид., допов. і перероб. – К.: Основа, 2006. – 444с.
2. Безопасность производственных процессов: справочник / [С.В.Белов, В.Н.Бринза, Б.С.Векшин и др.]; под общ. ред. С.В.Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448с.
3. Борьба с шумом на производстве: справочник / [Е.Я.Юдин, Л.А.Борисов, И.В.Горенштейн и др.]; под общ. ред. Е.Я.Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400с.

Надійшла до редколегії 26.06.2013.