

*Карманов А.В., Телюк А.С.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

*В статье предлагается структура стоимостного критерия, на основе которого может быть осуществлен расчет приемлемых частот и приемлемых коэффициентов снижения риска для многоканальной системы противоаварийной защиты, обслуживающей группу опасных технологических объектов. Приводится пример расчета указанных приемлемых показателей безопасности для технологических объектов процесса подготовки продукции нефтегазовых скважин.*

**Ключевые слова:** безопасность, риск, система противоаварийной защиты, коэффициент снижения риска.

### Введение

Система противоаварийной защиты (ПАЗ) используется для обеспечения безопасного функционирования технологических объектов на опасных производствах. Как правило, ПАЗ входит в состав автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и служит для автоматического перевода опасного технологического объекта (ТО) при возникновении на нем инцидента, в безопасное состояние, именуемое «остановом». Обычно инциденты на ТО возникают в том случае, когда некоторые его технологические параметры попадают в так называемые критические области (КО). При этом дальнейшая эксплуатация объекта недопустима, т.к. это может привести к различным нежелательным последствиям, например, к потерям продукции, авариям и т.п. Параметры, для которых определены критические области, в дальнейшем будут именоваться «критическими» параметрами.

Рассмотрим многоканальную ПАЗ [1], имеющую структурную схему, приведенную на рис. 1.

В общем случае многоканальная ПАЗ обслуживает  $n$  технологических объектов, где  $n \geq 1$ . Каждый  $j$ -ый ТО имеет  $m(j)$  критических областей (КО), при попадании в каждую из которых соответствующего «критического» параметра происходит инцидент, где  $m(j) \geq 1, j=1, \dots, n$ . Каждую  $s$ -ую КО, где  $s = 1, \dots, m(j)$ , на  $j$ -ом ТО обслуживает один  $(j,s)$ -канал ПАЗ, представляющий собой совокупность подсистем:  $(D_{j,s}, \text{ПЛК}, \text{ИУ}_j)$ .  $D_{j,s}$  – подсистема датчиков  $(j,s)$ -канала. ПЛК – программируемый логический контроллер, имеющий число входов не меньше  $m = m(1) + \dots + m(n)$ ;

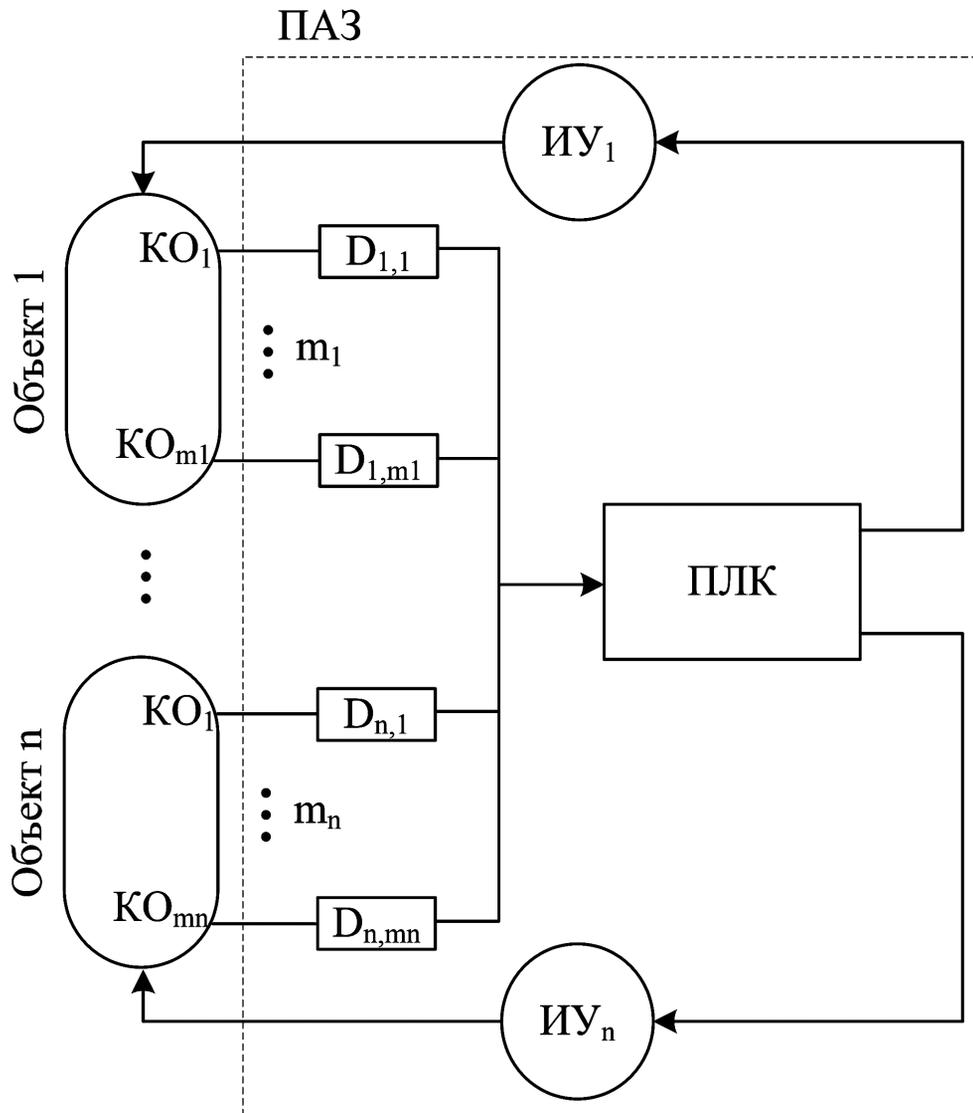


Рис. 1. Структура многоканальной ПАЗ

он осуществляет циклическую обработку входных данных, с целью определения попадания «критических» параметров в соответствующие КО. В том случае, если на  $j$ -ом объекте параметр попал в  $s$ -ую критическую область, то ПЛК выдает сигнал (команду) на подсистему исполнительных устройств – ИУ <sub>$j$</sub> , которая осуществляет «останов»  $j$ -ого объекта.

Отметим, что каждая подсистема, входящая в состав  $(j,s)$ -канала ПАЗ, может иметь достаточно сложную архитектуру [2], непосредственно влияющую на надежность канала. Например, подсистема датчиков  $D_{j,s}$ , в общем случае, как и любая иная подсистема, может иметь архитектуру  $M \circ \circ N$ , где  $N$  – общее количество параллельно работающих датчиков (каналов подсистемы),  $M$  – количество датчиков (каналов подсистемы), которые должны быть в работоспособном состоянии для того, чтобы подсистема датчиков качественно выполнила функцию измерения значения опасного параметра,  $M \leq N$ . Таким образом, отказ подсистемы наступает, если отказали  $(N-M+1)$  параллельно работающих каналов подсистемы. Понятно, что подсистема с простейшей архитектурой  $1 \circ \circ 1$  имеет надежность «ниже», чем подсистема с любой иной архитектурой, однако ее стоимость будет наименьшей при прочих равных условиях.

Качество работы многоканальной ПАЗ оценивается различными показателями безопасности. Одним из важнейших показателей является КСР $(j,s)$  – коэффициент снижения риска  $(j,s)$ -канала, где  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ . КСР $(j,s)$  является отношением  $F_{np}(j,s)$  к  $F_p(j,s)$ , где  $F_{np}(j,s)$  – частота

(интенсивность) возникновения инцидентов на  $j$ -ом ТО при попадании соответствующего опасного параметра в  $s$ -ую КО, а  $F_p(j,s)$  – частота (интенсивность) так называемых «не отработанных» инцидентов. «Не отработанный» инцидент возникает в том случае, когда произошел инцидент и ПАЗ не осуществила «останов» ТО, например, по причине отказа одной из подсистем, входящих в состав соответствующего  $(j,s)$ -канала ПАЗ. Таким образом, каждый инцидент, возникший на  $j$ -ом ТО по  $s$ -ой КО, является либо «отработанным» инцидентом, т.е. при этом ПАЗ перевела ТО в «останов», либо «не отработанным» инцидентом, т.е. ПАЗ не осуществила «останов» ТО.

Укажем следующие свойства, присущие каждому  $(j,s)$ -каналу ПАЗ:

1. Величина  $F_{np}(j,s)$  не зависит от наличия ПАЗ, а зависит от физических свойств ТО.
2. Чем выше надежность  $(j,s)$ -канала как восстанавливаемой системы, тем меньше величина  $F_p(j,s)$  и, следовательно, тем больше  $KCP(j,s)$ . У «абсолютно надежного»  $(j,s)$ -канала величина  $F_p(j,s)$  близка к нулю, однако при этом стоимость технических средств «абсолютно надежного»  $(j,s)$ -канала будет весьма высока.
3.  $KCP(j,s) \geq 1$ . Если  $KCP(j,s)$  равен единице, то выполняется равенство

$$F_p(j,s) = F_{np}(j,s). \quad (1)$$

Справедливо и обратное утверждение. Отметим, что, если выполняется равенство (1), то можно считать, что ПАЗ не обслуживает  $s$ -ую КО на  $j$ -ом ТО.

Коэффициент снижения риска  $KCP(j,s)$  можно рассматривать как отношение интенсивности  $F_{np}(j,s)$  простейшего потока инцидентов, возникающих по  $s$ -ой КО на  $j$ -ом ТО, к интенсивности  $F_p(j,s)$  потока «не отработанных» инцидентов. При этом поток «не отработанных» инцидентов представляется некоторым простейшим потоком, полученным операцией разрежения потока инцидентов [3, с.251]. Обычно интенсивностью  $F_p(j,s)$  оценивается интенсивность  $F_a(j,s)$  потока аварий на  $j$ -ом ТО, возникающих от «не отработанных» инцидентов по  $s$ -ой КО, т.к. выполняется неравенство

$$F_a(j,s) \leq F_p(j,s). \quad (2)$$

ПАЗ считается корректно спроектированной, если каждый ее  $(j,s)$ -канал имеет такой коэффициент снижения риска  $KCP_t(j,s)$ , который обеспечивает значение частоты  $F_p(j,s)$  не больше, чем некоторое приемлемое значение  $F_t(j,s)$ . Обоснованный выбор приемлемой частоты  $F_t(j,s)$  и соответственно  $KCP_t(j,s)$  является отдельной задачей, решение которой может осуществляться на основе различных критериев [4]. Ниже излагается постановка и решение задачи определения частот  $F_t(j,s)$  и коэффициентов снижения риска  $KCP_t(j,s)$ ,  $j=1, \dots, n$ ,  $s=1, \dots, m(j)$  для многоканальной ПАЗ на основе минимизации стоимостного критерия, учитывающего затраты на создание и эксплуатацию ПАЗ, а также ожидаемый ущерб от аварий.

## Постановка и решение задачи

Пусть предполагается эксплуатировать ПАЗ в течение  $T$  лет, тогда затраты  $C(A,T)$  на создание, эксплуатацию ПАЗ и ликвидацию аварий за время эксплуатации можно представить соответственно следующими тремя слагаемыми:

$$C(A,T) = C_1(A) + C_2(A) \cdot T + C_3(A, T). \quad (3)$$

Рассмотрим компоненты выражения (3).

$A$  – совокупность данных о ПАЗ, имеющая вид:

$$A = \{[A_{j,s}, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}, \quad (4)$$

где  $A_{j,s} = (A_{j,s}^{(1)}, A_{j,s}^{(2)}, A_{j,s}^{(3)})$ ,  $A_{j,s}^{(v)} = [(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)}]$ ,  $v = 1, 2, 3$ ,  $\tau$  – период контрольных проверок работоспособности ПАЗ. При этом если  $v=1$ , то данные соответствуют подсистеме датчиков (j,s)-канала ПАЗ;  $v=2$  – подсистеме ПЛК;  $v=3$  – подсистеме исполнительных механизмов (j,s)-канала. Совокупность  $A_{j,s}^{(v)}$ , где  $v=1,2,3$ , определяет для v-ой подсистемы (j,s)-канала ПАЗ следующие сведения:

1.1.  $(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)})$  – архитектура v-ой подсистемы, для которой в соответствии со структурой ПАЗ, представленной на рис. 1, выполняются соотношения:

$$M_{j,s}^{(2)} \circ N_{j,s}^{(2)} = M_j^{(2)} \circ N_j^{(2)}, M_{j,s}^{(3)} \circ N_{j,s}^{(3)} = M_j^{(3)} \circ N_j^{(3)}. \quad (5)$$

1.2.  $\xi_{j,s}^{(v)} = (\lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)})$ , где  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$ ,  $\beta_{j,s}^{(v)}$  – соответственно интенсивность отказа, уровень самодиагностики,  $\beta$ -фактор одного канала v-ой подсистемы [5]. При этом с учетом структуры ПАЗ имеют место равенства:

$$\xi_{j,s}^{(2)} = \xi_j^{(2)}, \xi_{j,s}^{(3)} = \xi_j^{(3)}. \quad (6)$$

Характеристики  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$ , указываются обычно заводом-изготовителем в паспорте на технические средства и существенно влияют на его стоимость.  $\beta$ -фактор, как правило [5], удовлетворяет соотношению:

$$0 < \beta_{j,s}^{(v)} < 0,3, v = 1, 2, 3, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j). \quad (7)$$

С учетом соотношений (5) и (6) совокупность  $A$  можно представить следующим образом:  $A = \{[(A_{j,s}^{(1)}, A_{j,s}^{(2)}, A_{j,s}^{(3)}), j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}$ . Отметим, что целью проверок, осуществляемых с периодичностью  $\tau$ , является контроль работоспособности всех подсистем ПАЗ. При этом в случае выявления отказа какой-либо подсистемы производится восстановление её работоспособности.

2.  $C_1(A)$  – инвентарная стоимость ПАЗ, т.е. затраты на создание и ввод в эксплуатацию ПАЗ. Эти затраты можно представить в виде следующей суммы:

$$C_1(A) = C_{11}(A) + C_{12}(A) + C_{13}(A) + Q(A), \quad (8)$$

где  $C_{11}(A)$  – суммарная стоимость всех датчиков ПАЗ,  $C_{12}(A)$  – стоимость подсистемы ПЛК,  $C_{13}(A)$  – суммарная стоимость всех исполнительных устройств ПАЗ,  $Q(A)$  – суммарные затраты на проектирование и ввод в эксплуатацию ПАЗ. В частности:

$$C_{11}(A) = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^{m(j)} a(\xi_{j,s}^{(1)}) \cdot N_{j,s}^{(1)}, \quad (9)$$

где  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$  – стоимость одного датчика (j,s)-канала,  $N_{j,s}^{(1)}$  – число датчиков в первой подсистеме (j,s)-канала;

$$C_{12}(A) = b(M^{(2)} \circ \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}), \quad (10)$$

где  $b(M^{(2)} \circ \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$  – стоимость ПЛК, имеющего архитектуру  $M^{(2)} \circ \circ N^{(2)}$  и характеристику  $\xi^{(2)} = (\lambda^{(2)}, \alpha^{(2)}, \beta^{(2)})$ ;

$$C_{13}(A) = \sum_{j=1}^n d(\xi_j^{(3)}) \cdot N_j^{(3)}, \quad (11)$$

где  $d(\xi_j^{(3)})$  – стоимость одного исполнительного устройства в третьей подсистеме (j,s)-канала,  $N_j^{(3)}$  – число исполнительных устройств.

Отметим, что стоимости  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$ ,  $b(M^{(2)} \circ \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$ ,  $d(\xi_j^{(3)})$  существенно зависят от показателей надежности и уровня самодиагностики, которые могут отличаться у различных заводоизготовителей.

3.  $C_2(A)$  – годовые затраты на эксплуатацию ПАЗ. Основная стоимость эксплуатационных работ приходится на проведение контрольных проверок работоспособности ПАЗ, которые проводятся с периодичностью  $\tau$ , где  $\tau$  – интервал времени, как правило, кратный одному месяцу. При этом контрольные проверки обычно осуществляются специализированной инженерной организацией. Годовая стоимость таких контрольных проверок зависит от объема работ и частоты их проведения. Эта величина  $C_2(A)$  может определяться выражением:

$$C_2(A) = \left( w_2(M^{(2)} \circ \circ N^{(2)}) + \sum_{j=1}^n \left[ w(M_j^{(3)} \circ \circ N_j^{(3)}) + \sum_{s=1}^{m(j)} w(M_{j,s}^{(1)} \circ \circ N_{j,s}^{(1)}) \right] \right) \cdot \frac{12}{\tau}, \quad (12)$$

где  $w_v(M^{(v)}_{j,s} \circ \circ N^{(v)}_{j,s})$  – стоимость одной проверки v-ой подсистемы, имеющей архитектуру  $(M^{(v)}_{j,s} \circ \circ N^{(v)}_{j,s})$ ,  $v = 1, 2, 3$ ;  $\tau$  – интервал, исчисляемый в месяцах;  $12 \cdot \tau^{-1}$  – число контрольных проверок в год.

4.  $C_3(A, T)$  – ожидаемый ущерб от аварий на интервале времени  $[0, T]$ , который, с учетом неравенства (2), можно оценить следующим образом:

$$C_1(A) = \sum_{j=1}^n Y_j \cdot \sum_{s=1}^{m(j)} F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T, \quad (13)$$

где  $Y_j$  – средний ущерб от одной аварии на j-ом ТО,  $F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T$  – среднее число «не отработанных» (j,s)-каналом инцидентов на интервале времени  $[0, T]$ . Отметим, что величина  $Y_j$  среднего ущерба от аварий на каждом технологическом объекте рассчитывается по стандартным методикам, например [6]. Также отметим, что соотношение (13) является следствием того, что ПЛК, входящий в состав ПАЗ, работает в режиме «реального времени», т.е. время необходимое для обнаружения и реагирования (j,s)-канала на инцидент меньше времени до появления опасного последствия (аварии) [1].

Прежде чем сформулировать задачу нахождения приемлемых величин  $F_t(j,s)$  и соответственно коэффициентов снижения риска  $KCP_t(j,s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  укажем, что при любой фикс-

рованной совокупности  $A$  существует [1] алгоритм  $G$  для расчета величин  $F_p(A_{j,s}, \tau)$ , т.е.  $F_p(A_{j,s}, \tau) = G(A_{j,s}, \tau, \omega)$ , где  $A_{j,s}$  компонента совокупности  $A$ ,  $\omega$  – совокупность показателей, влияющих на величину  $F_p(A_{j,s})$  и оцениваемых константами. Такими показателями могут являться: 1) предельное время восстановления отказавших элементов АСУ ТП, включая ПАЗ; 2) интенсивность  $F_{np}(j)$  возникновения инцидентов на  $j$ -ом ТО и т.п. Например, в ОАО «Газпром» предельное время восстановления не должно превышать 4 часа;  $F_{np}(j) \leq 1$  [1/год],  $j = 1, \dots, n$ . В этих условиях задача нахождения приемлемых интенсивностей  $F_t(j,s)$  и соответственно коэффициентов снижения риска  $KSP_t(j,s)$ , минимизирующих затраты  $C(A,T)$ , можно сформулировать следующим образом:

найти такие величины  $F_t(j,s) = G(A_{j,s}^t, \omega)$  и  $KSP_t(j,s) = F_{np}(j,s) \cdot F_t^{-1}(j,s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ , для которых выполняется равенство:

$$C_3(A^t, T) = \min \{ C_3(A, T) \mid A \in \Xi \}, \quad (14)$$

где  $C_3(A, T) = C(A, T) \cdot T^{-1}$  – затраты в год на создание, эксплуатацию и ликвидацию аварий за  $T$  лет эксплуатации ПАЗ,  $\Xi$  – множество возможных совокупностей вида  $A$ .

В частности в прикладных расчетах  $\Xi$  можно представить конечным множеством вида:

$$\Xi = \{ A = \{ [(A_{j,s}^{(1)} A_{j,s}^{(2)} A_{j,s}^{(3)})], j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j), \tau \} \mid A_{j,s}^{(v)} \in \Xi_{j,s}^{(v)}, v = 1, 2, 3, \tau \in \Theta \}, \quad (15)$$

где  $A_{j,s}^{(v)} = [ (M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)} ], \xi_{j,s}^{(v)} = ( \lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)} );$

$$\Xi_{j,s}^{(v)} = \{ A_{j,s}^{(v)} \mid M_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_1, N_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_2, k_1 \leq k_2,$$

$$\xi_{j,s}^{(v)} = \xi_{j,s}^{(v)}(1), \dots, \xi_{j,s}^{(v)}(r_{j,s}^{(v)}) \}, \quad (16)$$

где  $k_1, k_2$  – целые числа, определяемые множеством используемых архитектур для всех подсистем каждого канала ПАЗ,  $r_{j,s}^{(v)}$  – количество различных типов технических средств, которые могут быть использованы проектировщиками для построения  $v$ -ой подсистемы  $(j,s)$ -канала ПАЗ,  $\Theta = \{1, \dots, 12\}$  [мес.] или  $\{3, 6, 9, 12\}$  [мес.].

Задача (14) на множестве  $\Xi$  может быть решена на ПЭВМ методом полного перебора.

## Пример расчета приемлемых показателей безопасности

Рассмотрим часть технологического процесса абсорбционной осушки попутного нефтяного газа, которая реализуется на 2-х технологических блоках: абсорбера, дегазатора. «Критические»

Табл. 1. Перечень технологических блоков и критических областей на них

Ж	Технологические блоки	s	Критические области параметров
1	Блок абсорбера (колонна)	1	Перепад давления. $\Delta P=0.02$ [МПа]
		2	Уровень жидкости (нижний). $L_L=300$ [мм]
		3	Уровень жидкости (верхний). $L_H=800$ [мм]
2	Блок дегазатора	1	Уровень ТЭГ (нижний). $L_L=300$ [мм]
		2	Уровень ТЭГ (верхний). $L_H=750$ [мм]

параметры этих блоков имеют критические области, приведенные в таблице 1. Предполагается, что блоки будет обслуживать многоканальная ПАЗ в течение времени  $T = 10$  лет.

Средний ущерб от аварий: 1) для блока абсорбера –  $Y_1 = 3\,000$  тыс. р.; 2) для блока дегазатора –  $Y_2 = 1\,800$  тыс. р.

ПАЗ будет иметь структурную схему, приведенную на рис.1, где  $n = 2$ ,  $m(1) = 3$ ,  $m(2) = 2$ ,  $m = 3 + 2 = 5$ . Каждое множество  $\Xi_{j,s}^{(v)}$ , определяемое для  $v$ -ой подсистемы ( $j,s$ )-канала ПАЗ, где  $v = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  задается следующими параметрами:

$$k_1 = 2, k_2 = 3, \xi_{1,1}^{(1)}(1) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.6, 0.1),$$

$$\xi_{1,1}^{(1)}(2) = (6.7 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.7, 0.1), \xi_{1,2}^{(1)}(1) = \xi_{1,3}^{(1)}(1) = \xi_{2,1}^{(1)}(1) = \xi_{2,2}^{(1)}(1) = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.7, 0.1),$$

$$\xi_{1,2}^{(1)}(2) = \xi_{1,3}^{(1)}(2) = \xi_{2,1}^{(1)}(2) = \xi_{2,2}^{(1)}(2) = (1.25 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.6, 0.1),$$

$$\xi_{1,2}^{(1)}(3) = \xi_{1,3}^{(1)}(3) = \xi_{2,1}^{(1)}(3) = \xi_{2,2}^{(1)}(3) = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$\xi^{(2)}(1) = (2 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.8, 0.05), \xi^{(2)}(2) = (2.5 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.8, 0.05),$$

$$\xi^{(3)}_1(1) = \xi^{(3)}_2(1) = (1.42 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.15, 0.1),$$

$$\xi^{(3)}_1(2) = \xi^{(3)}_2(2) = (1.1 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.2, 0.1), \xi^{(3)}_1(3) = \xi^{(3)}_2(3) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.1, 0.1).$$

Значения затрат, используемых при формировании функционала (3), имеют следующие значения:

$$\xi_{1,1}^{(1)}(1) = 17 \text{ тыс. р.}, a(\xi_{1,1}^{(1)}(1)) = 20 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(1)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(1)) = 37.5 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(2)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(2)) = 24.6 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(3)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(3)) = 24 \text{ тыс. р.},$$

$$b(\xi^{(2)}(1)) = 96 \text{ тыс. р.}, b(\xi^{(2)}(2)) = 90 \text{ тыс. р.}, b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}) = b(\xi^{(2)}) \cdot N^{(2)},$$

$$d(\xi^{(3)}_1(1)) = d(\xi^{(3)}_2(1)) = 24 \text{ тыс. р.}, d(\xi^{(3)}_1(2)) = d(\xi^{(3)}_2(2)) = 33 \text{ тыс. р.},$$

$$d(\xi^{(3)}_1(3)) = d(\xi^{(3)}_2(3)) = 30 \text{ тыс. р.}$$

Множество  $\Theta = \{3, 6, 9, 12\}$  [мес.],  $\omega = \{ F_{np}(1,1) = F_{np}(1,2) = F_{np}(1,3) = 1/3 [1/\text{год}], F_{np}(2,1) = F_{np}(2,2) = 1/2 [1/\text{год}], MTTR = 4[\text{час}] \}$ , где MTTR – среднее время восстановления любой подсистемы ПАЗ.

Стоимость проверки каждой подсистемы:  $w_1(M^{(1)}_{j,s} \circ N^{(1)}_{j,s}) = w \cdot N^{(1)}_{j,s}$ ,  $w_2(M^{(2)} \circ N^{(2)}) = w \cdot N^{(2)}$ ,  $w_3(M^{(3)}_j \circ N^{(3)}_j) = w \cdot N^{(3)}_j$ , где  $w = 1$  тыс. руб.

Проведенный расчет дает следующее решение задачи (14):

$$A^t = \{[A_{j,s}^{(1)}, A^{(2)}, A^{(3)}], j = 1,2, s(1) = 1,2,3, s(2) = 1,2], \tau\}, \tau = 9 \text{ [мес.]},$$

$$A^{(1)}_{1,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,1}], \xi^{(1)}_{1,1} = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/ч], 0.6, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,2}], \xi^{(1)}_{1,2} = (10^{-5} [1/ч], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,3} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,3}], \xi^{(1)}_{1,3} = (10^{-5} [1/ч], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,1}], \xi^{(1)}_{2,1} = (10^{-5} [1/ч], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,2}], \xi^{(1)}_{2,2} = (10^{-5} [1/ч], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(2)} = [(1001), \xi^{(2)}], \xi^{(2)} = (2 \cdot 10^{-6} [1/ч], 0.8, 0.05),$$

$$A^{(3)}_1 = [(1002), \xi^{(3)}_1], \xi^{(3)}_1 = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/ч], 0.1, 0.1),$$

$$A^{(3)}_2 = [(1002), \xi^{(3)}_2], \xi^{(3)}_2 = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/ч], 0.1, 0.1).$$

При этом поток «не отработанных» инцидентов по каждому каналу ПАЗ имеет следующие интенсивности:

$$F_t(1,1) = 9 \cdot 10^{-4} [1/год]; F_t(1,2) = F_t(1,3) = 10^{-3} [1/год]; F_t(2,1) = F_t(2,2) = 1.5 \cdot 10^{-3} [1/год].$$

Каналы ПАЗ имеют следующие коэффициенты снижения риска:

$$КСР_t(1,1) = 390; КСР_t(1,2) = 332; КСР_t(1,3) = 332; КСР_t(2,1) = 332; КСР_t(2,2) = 332.$$

$$\text{Затраты } C_j(A^t, T) = 72.7 \text{ тыс. руб./год.}$$

## Литература

1. Карманов А.В., Телюк А.С., Модель и алгоритм расчета основных показателей многоканальной системы противоаварийной защиты. М.: Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2013, № 2.
2. Федоров Ю. Н., Справочник инженера АСУ ТП: проектирование и разработка, Москва: Инфра-Инженерия, 2008.
3. Кокс Д.Р., Смит В.Л. Теория восстановления. М.: Советское радио, 1967.
4. Карманов А.В., Шершукова К.П., Телюк А.С. Метод определения проектных показателей безопасности системы противоаварийной защиты для процессов подготовки продукции нефтегазовых скважин. М.: Научно-технический журнал «Надёжность», 2012, № 3(42).
5. Макдональд Д. Промышленная безопасность, оценивание риска и системы аварийного останова. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
6. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. Постановление Госгортехнадзора РФ от 29 октября 2002 № 63.