

## Вероятностное прогнозирование технического состояния информационных элементов автоматизированных систем управления противопожарной защитой нефтехимических производств

В. В. Пицук, В. И. Фомин, Л. В. Суховерхова, А. В. Болотский

ФГБОУ ВО Академия Государственной противопожарной службы  
129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4

e-mail: pitsyk43@mail.ru, kafedra-pa@yandex.ru,  
suhoverhova82@mail.ru, bolotskiy46@yandex.ru

*Аннотация.* Предложена методика вероятностного прогнозирования технического состояния информационной компоненты автоматизированных систем управления противопожарной защитой, применяемых в нефтехимической отрасли. Даны постановка и решение задачи, положенные в основу методики. Приводятся интерфейс разработанной программы расчета по предложенной методике. Приводится типовой пример расчета с иллюстрацией полученного решения.

*Ключевые слова:* автоматизированная система управления, пожарная защита, система информационного обеспечения, надежность, интенсивность отказов, интенсивность восстановления.

### 1. Введение

Анализ данных об авариях, произошедших в нефтехимической отрасли, позволяет судить о сложном и опасном характере их развития и о необходимости дальнейшего совершенствования автоматизированных систем управления противопожарной защитой ее производственных предприятий [1, 2]. Важным их элементом является система информационного обеспечения (СИО), позволяющая в режиме реального времени осуществлять контроль технологического процесса, состояния оборудования, производственных средств и окружающей среды.

В своем развитии СИО использует современные информационные технологии и программно-технические средства, которые обеспечивают оперативное управление базами данных и эффективное использование баз знаний. Комплексное использование в них перспективных разработок и типовых решений позволяет выполнять значительный объем задач по информационно-аналитическому обеспечению безопасности территорий и объектов нефтехимии, включая:

- контроль территорий и объектов, событий и показателей;

- оценку состояния территорий и объектов, процессов и хода выполнения задач по обеспечению их экологической безопасности;
- прогноз развития обстановки и ее влияния на состояние пространств, территорий и объектов, а также широкий спектр других, важных и значимых для объекта автоматизации задач.

Система информационного обеспечения характеризуется насыщенностью, большим числом пространственно разнесенных измерительных средств измерений, газоанализаторов, приборов для контроля инженерных конструкций, противоаварийной защиты и др. Своевременное получение ими достоверной информации во многом зависит от их надежной работы. Так, в частности, в паспортных данных наработка на отказ дымового извещателя ИП 212-3СУ составляет величину  $T_d = 60\,000$  часов, ручного извещателя ИПР-3СУ —  $T_p = 60\,000$  часов. Это значит, что при интенсивности отказа  $\lambda = 1/T = 1.67 \times 10^{-5} \cdot 1/\text{ч}$  они должны исправно работать около 7 лет [3, 4].

Для обеспечения требуемой надежности работы автоматизированных систем управления противопожарной защитой важна правильно организованная на предприятиях работа по их техническому диагностированию и обслуживанию, опирающаяся на прогнозируемые показатели надежности элементов и системы в целом. Поэтому актуальным и теоретически важным стоит вопрос о прогнозировании надежности этих систем, работающих в конкретных условиях на нефтехимических производствах.

В данной работе представлена методика прогнозирования состояния многопараметрических восстанавливаемых автоматизированных систем пожарной сигнализации (АСПС), используемых на предприятиях нефтехимии, и отдельных элементов таких систем. В основу ее положено предлагаемое решение сформулированной ниже задачи.

Введем исходные предположения в ее постановку.

1. Прогнозирование состояния АСПС проводится применительно к высоконадежным восстанавливаемым информационным элементам (узлам), входящих в ее состав.

2. В АСПС имеется  $l$  узлов (шлейфов) с номером  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, l$ .

3. В каждом узле имеется  $n_k$  датчиков, где  $n$  — общее их число;  $k$  — номер узла.

4. Предположим, без потери общности (для удобства дальнейшего изложения), что в каждом узле может находиться только один тип датчиков. Каждый их тип имеет индивидуальные технические характеристики — определяющие параметры  $U_{ki}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m_i$ , где  $m_i$  — число параметров для датчика с номером  $i$ . Каждый из параметров характеризуется своим номинальным (верхним/нижним) допусковым

значением. Выход параметра за допуск свидетельствует о том, что в процессе функционирования датчик утратил свои первоначальные свойства, и, следовательно, в нем произошел параметрический отказ.

5. АСПС — восстанавливаемая система: отказавший в ней элемент подлежит незамедлительному восстановлению. Тогда для определяющих параметров  $U_{ki}$  интенсивность отказов  $\lambda_k$  и интенсивность восстановления  $\mu_k$  одинаковы в однотипных датчиках АСПС. Это позволит в дальнейшем использовать для расчета вероятности состояния каждого отдельного датчика суммарные интенсивности отказов  $\lambda_k = \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_{ik}$  и восстановления  $\mu_k = \sum_{i=1}^{n_k} \mu_{ik}$  соответственно.

6. Рассматриваемая система пожарной сигнализации установлена на нефтехимическом производстве, относящемся к потенциально опасным объектам [5]. Поэтому будем считать, что узел системы окажется в нерабочем состоянии, если в нем выйдет из строя более одного датчика. И поскольку датчики обладают параметрическими отказами, то будем считать датчик нерабочим, если все его определяющие параметры вышли за пределы допустимых значений. Датчики в узле соединены последовательно, если проектом предусмотрено резервирование, то датчики на таком участке включаются в цепь параллельно. Резервирование учитывается как дополнительный определяющий параметр [6].

## 2. Постановка и решение задачи

В предположениях 1–6 требуется рассчитать вероятности  $p_{ik}$  и  $P_{yk}$  — нерабочего состояния  $i$ -го датчика в  $k$ -м узле и  $k$ -го узла системы для прогнозируемого момента времени  $t = t^*$  соответственно. И затем по найденным значениям вероятностей  $p_{ik}$  и  $P_{yk}$  требуется рассчитать вероятность  $P_{p.c.c.}$  — рабочего состояния системы (АСПС) в целом.

Решение задачи будем находить по следующей схеме.

1. Воспользуемся методом локального прогнозирования для систем с параметрическими отказами для нахождения  $P_{m,j}(t)$  — вероятности события, состоящего в том, что из общего числа  $m_i$  определяющих параметров за пределами допусков может оказаться фиксированное их число  $j$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, m$ . Для каждого  $i$ -го датчика в  $k$ -м узле составим систему уравнений Эрланга, общее рекуррентное решение которого представлено в работе [7] для различного числа  $m$  определяющих параметров. В табл. 1 приведем формулы расчета вероятности  $P_{m,j}(t)$  для определяющих параметров  $m = 1$  и  $m = 2$ , поскольку самыми распространенными пожарными датчиками являются датчики, реагирующие на один или два фактора пожара.

Таблица 1. Формулы для вычисления вероятности  $P_{m,j}(t)$

$m = 1, j = 0, 1$	
$P_{m,j}(t)$	$P_{1,0}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, P_{1,1}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$
$m = 2, j = 0, 1, 2$	
$P_{m,j}(t)$	$P_{2,0}(t) = \frac{\mu^2}{\lambda^2 + \lambda\mu + \mu^2} + \frac{\lambda e^{-(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})t}}{2(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})} + \frac{\lambda e^{-(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})t}}{2(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})},$ $P_{2,1}(t) = \frac{\lambda\mu}{\lambda^2 + \lambda\mu + \mu^2} + \frac{\lambda(\lambda - \sqrt{\lambda\mu})e^{-(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})t}}{2\sqrt{\lambda\mu}(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})} - \frac{\lambda(\lambda + \sqrt{\lambda\mu})e^{-(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})t}}{2(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})},$ $P_{2,2}(t) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \lambda\mu + \mu^2} - \frac{\lambda^2 e^{-(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})t}}{2\sqrt{\lambda\mu}(\lambda + \mu - \sqrt{\lambda\mu})} + \frac{\lambda^2 e^{-(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})t}}{2\sqrt{\lambda\mu}(\lambda + \mu + \sqrt{\lambda\mu})}$

2. По найденным вероятностям  $P_{m,j}(t)$  находим вероятность  $p_{ik}$  нерабочего состояния датчика в  $k$ -м узле. Она будет равна  $p_{ik} = \sum_{j=1}^m P_{m,j}$ .

3. Находим вероятность  $P_{yk}$  нерабочего состояния  $k$ -го узла. Для этого воспользуемся классическими формулами из теории вероятностей [8]. Обозначим событие  $A$  — в  $k$ -м узле отказало более одного датчика, тогда событие  $\bar{A}$  — в  $k$ -м узле отказало не более одного датчика. События  $A$  и  $\bar{A}$  — противоположные. Поэтому:

$$P_{yk}(A) = 1 - P_{yk}(\bar{A}) = 1 - (P_{n_k}(0) + P_{n_k}(1)),$$

где  $P_{n_k}(0)$  — вероятность того, что из числа  $n_k$  датчиков в  $k$ -м узле из строя не выйдет ни один датчик, или все датчики будут в рабочем состоянии;  $P_{n_k}(1)$  — вероятность того, что из числа  $n_k$  датчиков в  $k$ -м узле из строя выйдет ровно один датчик. Пользуясь формулой Бернулли для нахождения указанных выше вероятностей, получим формулу для расчета нерабочего состояния  $k$ -го узла:

$$P_{yk}(A) = 1 - ((1 - p_k)^{n_k} + n_k p_k (1 - p_k)^{n_k - 1}),$$

где  $p_k = p_{ik}$  по п. 4 исходных предположений.

4. Находим вероятность рабочего состояния  $k$ -го узла [8]:

$$\bar{P}_{yk} = 1 - P_{yk}.$$

5. По теореме умножения вероятностей находим вероятность рабочего состояния системы на заданный отрезок времени  $t^*$ :

$$P_{p.c.c.} = \prod_{k=1}^l \bar{P}_{yk}.$$

Разработано программное обеспечение на языке C++, которое позволяет рассчитывать состояние системы по экспериментальным значениям  $\lambda$  и  $\mu$ .

Интерфейс программы представлен на рис. 1.

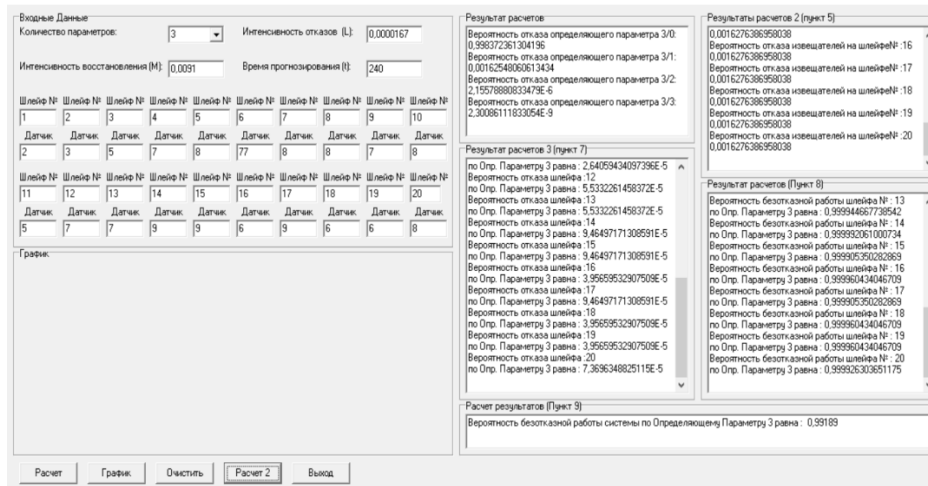


Рисунок 1. Интерфейс программы расчета состояния системы с параметрическими отказами

Проведем расчет надежности пожарной сигнализации, установленной в одном из цехов нефтехимического завода, пользуясь известными методиками [9, 10] и предложенной в данной работе. Пожарная сигнализация «Болид» интегрирована в автоматизированную систему управления противопожарной защиты, эксплуатируемую на предприятии нефтехимической отрасли. В качестве исходной информации для оценки интенсивности отказов и восстановления используются ее эксплуатационные данные по неисправностям (или «отказам»).

### 3. Пример применения разработанной методики

Система пожарной сигнализации имеет один шлейф  $k = 1$ , в шлейф последовательно подключены дымовые извещатели в количестве  $n_1 = 30$  шт. Каждый извещатель имеет интенсивность отказов  $\lambda_i = 1/T = 1.67 \cdot 10^{-5}$  1/ч. Дымовые извещатели характеризуются одним определяющим параметром  $m_i = 1$ . Найти вероятность рабочего состояния системы пожарной сигнализации для отрезка времени  $t = 240$  часов.

Решение.

1. Проведем расчет состояния системы пожарной сигнализации по методикам [9, 10]:

$$\lambda_{30} = \lambda_i \cdot n_1 = 1.67 \cdot 10^{-5} \cdot 30 = 0.000501 \approx 0.0005 \text{ 1/ч.}$$

$$P_{\text{НПБ}}(t) = e^{-\lambda_{30} \cdot t}.$$

$$P_{\text{НПБ}}(240) = e^{-0.0005 \cdot 240} \approx 0.887.$$

2. Проведем расчет с помощью программного продукта, учитывая экспериментально полученные значения  $\lambda = 0.00073$  1/ч и  $\mu = 0.0096$  1/ч:

$$P_{\text{р.с.с.}}(240) \approx 0.41.$$

3. По результатам расчета построим номограмму.

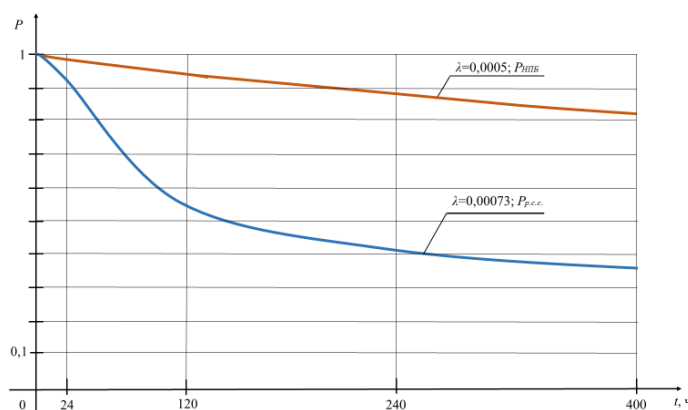


Рисунок 2. Номограмма рабочего состояния системы пожарной сигнализации «Болид»

## 4. Заключение

Разработанная методика позволяет выполнять прогноз рабочего состояния многопараметрических восстанавливаемых автоматизированных систем противопожарной защиты, используемых на предприятиях нефтехимии, и отдельных элементов таких систем с учетом особенностей их функционирования. Предложенный в работе метод может применяться, в том числе, на объектах нефтегазовой отрасли и других потенциально опасных производствах.

## Литература

- [1] Информация об авариях, произошедших на предприятиях, подконтрольных территориальным органам Федеральной службы по экологическому, технологическому, атомному надзору. Ростехнадзор [Электронный ресурс] URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/>
- [2] Болотский А. В., Фомин В. И. Статистика пожаров на объектах по производству резинотехнических изделий // *Научный интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. 2017. № 3 (73). С. 1–5. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/05-03-17.ttb.pdf>

- [3] Паспорт. Извещатель пожарный дымовой оптико-электронный ИП 212-3СУ НКСТ.425231.000-02 ПС
- [4] Паспорт. Извещатель пожарный ручной ИПР-3СУ ЦФСК 425232.001-01 ПС.
- [5] Приказ МЧС России № 105 от 28.02.2003 «Об утверждении требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения».
- [6] *Суховерхова Л. В.* Оценка состояния технических систем с резервированными восстанавливаемыми элементами // *Сборник научных трудов «Проблемы создания и испытаний вооружения РКО»*. Ч. 1. — М. : НИЦ 4 ЦНИИ МО, 2012. С. 222–230.
- [7] *Пицык В. В., Гамаюнов Е. Г., Суховерхова Л. В.* Методика оценки надежности системы пожарной сигнализации с параметрическими отказами // *Научный интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. 2011. № 6 (40). С. 1–8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-6/16-06-11.ttb.pdf>
- [8] *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. — М. : Высшая школа, 2002.
- [9] НПБ 58-97 Системы пожарной сигнализации адресные. Общие технические требования. Методы испытаний.
- [10] РНД 73-16-90 Методика по расчету показателей надежности системы оповещения о пожаре и управления эвакуацией людей при пожаре.

**Авторы:**

*Виктор Васильевич Пицык* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Академия государственной противопожарной службы МЧС России

*Владимир Иванович Фомин* — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры пожарной автоматики, Академия государственной противопожарной службы МЧС России

*Людмила Васильевна Суховерхова* — кандидат технических наук, докторант факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия государственной противопожарной службы МЧС России

*Алексей Владимирович Болотский* — адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия государственной противопожарной службы МЧС России

---

## Probabilistic forecasting of technical condition information elements of automated control systems of fire protection of petrochemical production

V. V. Pitsyk, V. I. Fomin, L. V. Sukhoverkhova, A. V. Bolotsky

Academy of state fire service of EMERCOM of Russia

4, B. Galushkina str., Moscow, 129366, Russia

e-mail: pitsyk43@mail.ru, kafedra-pa@yandex.ru, suhoverhova82@mail.ru, bolotskiy46@yandex.ru

*Abstract.* The technique of probabilistic forecasting of the technical condition of the information component of automated fire protection control systems used in the petrochemical industry is proposed. The formulation and solution of the problem underlying the methodology are given. The interface of the developed program of calculation on the offered technique is resulted. A typical example of calculation with an illustration of the obtained solution is given.

*Keywords:* automated control system, fire protection, information support system, reliability, failure rate, recovery rate.

## References

- [1] *Rostekhnadzor.* <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> [In Rus]
- [2] *Bolotsky A. V., Fomin V. I. (2017) Technology of technosphere safety, 3(73):1–5.* [In Rus]
- [3] *Passport. Smoke detector opto-electronic IP 212-3SU.* [In Rus]
- [4] *Passport. Fire detector manual IPR-3SU.* [In Rus]
- [5] *The order of EMERCOM of Russia 105 dated 28.02.2003.* [In Rus]
- [6] *Sukhoverkhova L. V. (2012) Problems of creation and testing of RSD weapons, 1:222–230.* [In Rus]
- [7] *Pitsyk V. V., Gamayunov E. G., Sukhoverkhova L. V. (2011) Technology of technosphere safety, 6(40):1–8.* [In Rus]
- [8] *Wentzel E. S. (2002) Probability theory.* [In Rus]
- [9] *Fire safety standards 58-97 fire alarm systems address. General technical requirements. Test method.* [In Rus]
- [10] *RND 73-16-90 Methodology for calculating indicators of reliability of systems of fire warning and evacuation management of people during fire.* [In Rus]