

Научная статья

УДК 681.5; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-23-33

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

✉ Гарелина Светлана Александровна.

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия.

Актерский Юрий Евгеньевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке методики проектирования средств измерений для систем мониторинга и контроля параметров производственных процессов, основанной на принципах управления техногенным риском. Основное внимание уделено обеспечению требуемых метрологических характеристик средств измерений при ограниченных ресурсах и необходимости их обоснованного выбора. Теоретическую основу методики составляет критерий взаимосвязи «ущерб-СКП», связывающий метрологические параметры (среднюю квадратическую погрешность измерения) приборов с уровнем техногенного риска и величиной возможных экономических потерь, возникающих при аварийных и чрезвычайных ситуациях. На его базе реализованы этапы структурной и параметрической оптимизации, а также экономическая оценка эффективности внедрения прибора. Такой подход обеспечивает согласованное рассмотрение метрологических, конструктивных и стоимостных факторов в единой системе критериев. В качестве примера применения методики рассмотрено проектирование оптико-пирометрического газоанализатора, включающее анализ альтернативных схем, математическое моделирование измерительного преобразования и оценку метрологических характеристик. Разработанный подход отличается универсальностью, поскольку его можно применять для проектирования различных типов средств измерений и на всех этапах их жизненного цикла (от структурной оптимизации до экономической оценки эффективности). Он прошел практическую апробацию и может быть использован при проектировании и модернизации промышленных систем мониторинга и управления техногенными рисками.

Ключевые слова: средства измерений, система мониторинга и контроля, техногенный риск, среднеквадратическая погрешность, критерий «ущерб-СКП», структурная оптимизация, параметрическая оптимизация, экономическая оценка эффективности, проектирование средств измерений

Для цитирования: Гарелина С.А., Актерский Ю.Е. Методика проектирования средств измерений для систем мониторинга и контроля параметров производственного процесса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 23–33. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-23-33.

Scientific article

METHODOLOGY FOR DESIGNING MEASURING DEVICES FOR MONITORING AND CONTROL SYSTEMS OF PARAMETERS OF THE PRODUCTION PROCESS

✉Garelina Svetlana A.

Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia.

Aktersky Yury E.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. The article is devoted to the development of a methodology for designing measuring instruments for monitoring and control systems of production process parameters, based on the principles of managing technogenic risk. The main focus is on ensuring the required metrological characteristics of measuring instruments with limited resources and the need for their justified selection. The theoretical basis of the methodology is the «damage-SKP» relationship criterion, which links the metrological parameters (mean square measurement error) of instruments with the level of technogenic risk and the amount of possible economic losses that occur in emergency situations. It includes stages of structural and parametric optimization, as well as an economic assessment of the device's implementation. This approach ensures a consistent consideration of metrological, design, and cost factors in a unified system of criteria. As an example of the methodology's application, the design of an optical pyrometric gas analyzer is considered, which includes the analysis of alternative schemes, mathematical modeling of the measurement conversion, and evaluation of metrological characteristics. The developed approach is versatile, as it can be applied to the design of various types of measuring instruments and at all stages of their life cycle (from structural optimization to economic evaluation of effectiveness). It has been practically tested and can be used in the design and modernization of industrial monitoring and management systems for technogenic risks.

Keywords: measuring instruments, monitoring and control system, technogenic risk, root mean square error, «damage-RMSE» criterion, structural optimization, parametric optimization, economic efficiency assessment, design of measuring instruments

For citation: Garelina S.A., Aktersky Yu.E. Methodology for designing measuring devices for monitoring and control systems of parameters of the production process // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 23–33. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-23-33.

Введение

Мониторинг и контроль параметров производственных процессов являются основными элементами системы предупреждения техногенных ЧС. Переход к упреждающему управлению рисками, обозначенный в стратегических документах Российской Федерации^{1,2}, требует совершенствования технических и методических основ мониторинга. В условиях износа производственной инфраструктуры, усложнения технологических схем и повышения требований к промышленной безопасности [1–3] особое значение приобретает обоснованный

¹ Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года: Указ Президента Рос. Федерации от 11 янв. 2018 г. № 12. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

² Стратегия национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Рос. Федерации от 2 июля 2021 г. № 400. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

выбор метрологических характеристик средств измерений (СИ). Именно эти характеристики определяют вероятность пропуска опасных состояний и масштаб потенциального ущерба, возникающего при несвоевременном или ошибочном обнаружении отклонений контролируемых технологических параметров, что в совокупности формирует уровень техногенного риска.

Таким образом, система мониторинга и контроля в современных условиях выступает не только средством контроля, но и инструментом управления техногенным риском. Снижение неопределенности измерений связано с ростом затрат, при том что финансовые ресурсы предприятий ограничены, а зависимость между стоимостью СИ и их метрологическими характеристиками, в частности средней квадратической погрешностью (СКП), носит выраженно нелинейный характер. Следовательно, проектирование СИ для систем мониторинга и контроля должно опираться не на достижение минимальной неопределенности измерений, а на рациональное соотношение метрологических характеристик приборов, стоимости их реализации и уровня техногенного риска.

Современные подходы к проектированию СИ активно развиваются в различных направлениях [4–9]:

1. Model-Based Design, цифровая метрология, функционально-ориентированное и мультикритериальное проектирование. Применение цифровых моделей и алгоритмов адаптивной оптимизации позволяет оценивать характеристики СИ еще на этапе проектирования, что сокращает затраты на разработку и повышает эффективность процесса.

2. Развитие концепций «умных» датчиков и управляемых СИ с функцией самодиагностики, обеспечивающих повышение достоверности измерений в условиях нестабильных режимов эксплуатации.

Несмотря на значительные достижения, указанные подходы ориентированы преимущественно на совершенствование метрологических и эксплуатационных свойств приборов, в то время как их взаимосвязь с техногенным риском и экономическими последствиями измерительных ошибок остается недостаточно формализованной.

В большинстве известных исследований процесс проектирования СИ рассматривается как последовательное решение задач анализа, синтеза и оптимизации (например, Кревченко Ю.Р., Шайхутдинов Д.В. Проектирование измерительных приборов и систем: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, 2015. 283 с.; Герасимова Е.Б., Герасимов Б.И. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2022. 236 с.; Подмастерьев К.В. Точность измерительных устройств: учеб. пособие для вузов. Орел: ОрелГТУ, 2004. 139 с.). При этом методы оптимизации применяют в различной последовательности и опираются на неоднородные критерии – надежность, погрешности приближения, чувствительность, близость статической характеристики к прямой, стоимость и другие параметры, что не позволяет сформировать единый подход к оценке эффективности проектируемых СИ. Вследствие этого отсутствует общепринятый параметр оптимизации, способный одновременно учитывать метрологические, конструктивные и экономические аспекты.

Таким образом, существующие подходы к проектированию СИ не обеспечивают формализованного учета взаимосвязи между метрологическими параметрами, уровнем техногенного риска и затратами, что затрудняет обоснование рациональных параметров приборов при создании систем мониторинга и контроля. В этой связи настоящая работа направлена на разработку методики проектирования СИ, обеспечивающей управление риском на основе критерия взаимосвязи «ущерб-СКП».

Материалы и методы исследования

Для количественной оценки взаимосвязи метрологических характеристик и уровня техногенного риска R используем выражение [10]:

$$R(\sigma) = P_0 P_{\text{пропуск}}(\sigma) Y(\sigma) = P_0 \Phi(-\Delta/\sigma) C \sigma^2, \quad (1)$$

где P_0 – вероятность появления критического отклонения параметра мониторинга и контроля от нормы; $P_{\text{пропуск}} = \Phi(-\Delta/\sigma)$ – вероятность его пропуска системой мониторинга; σ – СКП СИ; $Y(\sigma) = C\sigma^2$ – потенциальный ущерб.

Анализ выражения (1) показывает, что риск включает два фактора: вероятность пропуска опасного состояния $P_{\text{пропуск}}(\sigma)$ и масштаб возможного ущерба $Y(\sigma)$. При увеличении СКП σ вероятность пропуска возрастает относительно умеренно, тогда как ущерб увеличивается квадратично, а в объемных сценариях – кубически. В результате риск растет нелинейно и значительно быстрее, чем изменение вероятности. Расчеты показывают, что даже при увеличении вероятности пропуска всего на 20–30 % соответствующий ущерб может возрасти в 4–9 раз, что приводит к кратному увеличению уровня риска.

Полученная зависимость позволяет сформулировать критерий обоснования параметров СИ в виде соотношения «ущерб-СКП». Этот критерий обеспечивает не только количественную оценку влияния метрологических характеристик на техногенный риск, но и возможность решения как прямой, так и обратной задачи. В первом случае по заданному значению СКП определяют ожидаемый уровень техногенного риска, во втором – по допустимому ущербу устанавливают требуемые метрологические параметры СИ. Таким образом, критерий «ущерб-СКП» служит инструментом для рационального проектирования СИ при ограниченных ресурсах. В отличие от традиционных подходов, где структурная схема и параметры приборов определяют отдельно, предложенная методика позволяет рассматривать их взаимосвязано – через соотношение ущерба и СКП как оценочного критерия.

Этапы методики:

Этап 1. Выбор метода измерения. Выбор осуществляют на основе метода анализа иерархий, так как цели, задачи и альтернативы известны. Метод опирается не только на экспертные оценки, но и на достоверные количественные данные по критериям выбора.

Этап 2. Структурная оптимизация. Подбор конкурентных структурных схем, получение их математических моделей метрологических характеристик, выбор схемы с минимальной СКП.

Этап 3. Параметрическая оптимизация. Построение математических моделей погрешностей, расчет СКП, подбор параметров, минимизирующих СКП.

Этап 4. Экономическая оценка. Ее проводят по нормативам Бюджетного кодекса Российской Федерации и Федерального закона от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»:

1. Определение экономического эффекта E . Под эффектом понимается измеримое улучшение, полученное в результате внедрения разработанного СИ:

$$E = \Delta Y + \Delta \Pi,$$

где ΔY – предотвращенный ущерб, определяемый как разность между ожидаемыми потерями до и после внедрения СИ; $\Delta \Pi$ – прирост производительности, снижение времени простоя, экономия энергоресурсов и др. (опционально, в зависимости от задачи).

2. Оценка совокупных затрат Z . Полные затраты включают:

$$Z = C_{\text{покупка}} + C_{\text{наладка}} + C_{\text{обслуживание}} + C_{\text{обучение}},$$

где $C_{\text{покупка}}$ – цена СИ; $C_{\text{наладка}}$ – стоимость ввода СИ в эксплуатацию; $C_{\text{обслуживание}}$ – эксплуатационные расходы (техническое обслуживание, поверка, ремонт); $C_{\text{обучение}}$ – стоимость обучения персонала.

3. Расчет базового показателя эффективности: $E_{\text{эф}} = E/Z$. Критерий обоснованности внедрения: внедрение СИ признается экономически целесообразным при выполнении условия $E_{\text{эф}} \geq 1$.

4. Учет неопределенности: критерий Гурвица. В условиях неполной информации или наличия риска отклонения параметров оценки используют критерий Гурвица для определения ожидаемого эффекта:

$$E_{\text{ож}}: E_{\text{ож}} = \lambda E_{\text{max}} + (1 - \lambda) E_{\text{min}},$$

где λ – коэффициент пессимизма; E_{max} , E_{min} – максимальный и минимальный возможные экономические эффекты.

Если $E_{\text{ож}} \geq Z$, то проект считается оправданным даже при неопределенности данных.

Этап 5. Приборная реализация. Включает разработку опытного образца, его испытания, корректировку параметров и подтверждение соответствия заявленным метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Преимущества предложенной методики:

- системный подход – взаимосвязанный технический, метрологический и экономический анализ;
- применимость на всех этапах жизненного цикла СИ;
- возможность интеграции в процессы цифровизации и риск-менеджмента.

Ограничения: необходимость экспертных данных на ранних этапах, сложность при большом количестве альтернатив, зависимость результатов от корректности математических моделей и исходной информации.

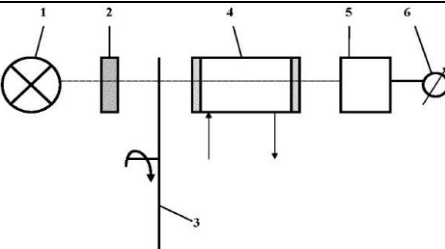
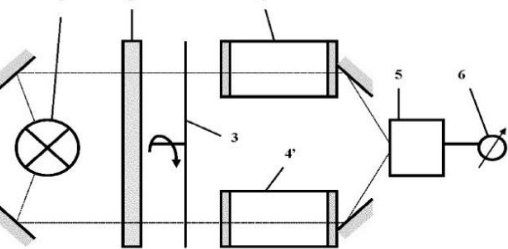
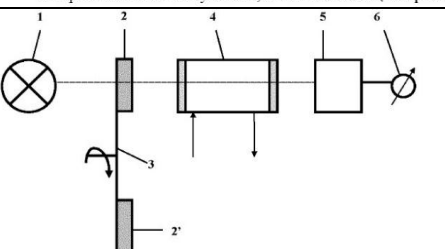
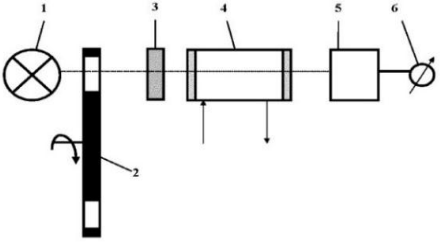

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика основана на обобщении практического опыта и ранее выполненных разработок различных видов СИ, направленных на повышение эффективности технологического контроля. Приведенные в данном разделе материалы не представляют собой новую разработку прибора, а служат примером реализации методики. В качестве иллюстрации рассмотрен оптико-пирометрический газоанализатор, созданный в рамках предыдущих опытно-конструкторских работ [11]. Его анализ демонстрирует применимость предложенного подхода к реальным СИ и подтверждает универсальность методики. Таким образом, разработанная методика выступает инструментом системного проектирования СИ, обеспечивающим согласование метрологических, конструктивных и экономических параметров на единой основе.

Пример иллюстрирует применение риск-ориентированного подхода на всех этапах проектирования – от структурной оптимизации до метрологического анализа и экономической оценки.

1. Выбор рациональной структуры.

На основании анализа известных схем (рис. 1) предложена оптико-пирометрическая схема газоанализатора (рис. 2), обеспечивающая двойное прохождение луча через измерительную кювету без использования сравнительной ячейки и узкополосного ИК-фильтра, что позволило уменьшить стоимость и габариты прибора.

Номер альтернативы	Оптическая схема	Приборы, в которых реализованы оптические схемы
Альтернатива А1	 <p>Однолучевой газоанализатор с неселективным приемником излучения:</p> <p>1 - источник ИК - излучения; 2 - светофильтр; 3 - модулятор;</p> <p>4 - кювета; 5 - приемник ИК - излучения; 6 - показывающий прибор.</p>	Необходима частая калибровка, что требует немало времени и труда, что не всегда удобно для приборов непрерывного действия
Альтернатива А2	 <p>Двухлучевой газоанализатор с неселективным приемником излучения:</p> <p>1 - источник ИК - излучения; 2 - светофильтр; 3 - модулятор;</p> <p>4 - рабочая кювета; 4' - сравнительная кювета;</p> <p>5 - приемник ИК - излучения; 6 - показывающий прибор.</p>	Различная степень загрязнения кювет и чувствительность к неинформативным параметрам при наложении полос поглощения, устройства разделения и сведения пучков излучения весьма сложны
Альтернатива А3	 <p>Двухволновой газоанализатор:</p> <p>1 - источник ИК - излучения; 2 - светофильтр рабочий;</p> <p>2' - светофильтр сравнительный; 3 - модулятор;</p> <p>4 - кювета; 5 - приемник ИК - излучения; 6 - показывающий прибор.</p>	Избирательность и чувствительность определяются в основном применяемыми интерференционными фильтрами
Альтернатива А4	 <p>Газоанализатор с газонаполненным фильтром:</p> <p>1 - источник ИК - излучения; 2 - газонаполненный фильтр-модулятор;</p> <p>3 - светофильтр; 4 - кювета;</p> <p>5 - приемник ИК - излучения; 6 - показывающий прибор.</p>	Избирательность и чувствительность определяются в основном применяемыми интерференционными фильтрами
Альтернатива А5	 <p>Двухканальный газоанализатор с неселективным приемником излучения и пульсирующим источником излучения:</p> <p>1 - пульсирующий источник ИК - излучения; 2 - светофильтры;</p> <p>3 - приемники ИК - излучения; 4 - кювета; 5 - показывающий прибор.</p>	В схеме используют два оптических фильтра, два окна и два пирометра (стоимость оптического фильтра на порядки превышает стоимость окна), на каждый анализируемый газ используют по два фильтра

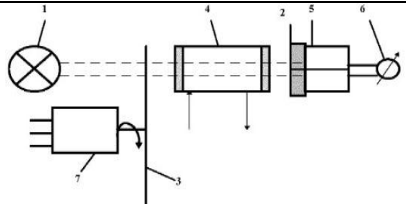
Номер альтернативы	Оптическая схема	Приборы, в которых реализованы оптические схемы
Альтернатива А6	 <p>Двухканальный газоанализатор с неселективным приемником излучения: 1 - источник ИК - излучения ; 2 - светофильтры ; 3 - модулятор ; 4 - кювета ; 5 - приемники ИК - излучения ; 6 - показывающий прибор ; 7 - шаговый двигатель.</p>	В схеме использованы два оптических фильтра и два пирометра

Рис. 1. Альтернативные оптические схемы для реализации газоанализаторов, выпускаемые различными фирмами

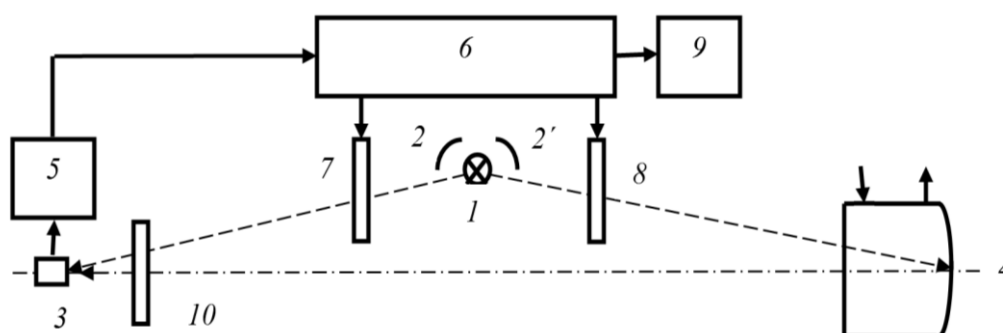


Рис. 2. Функциональная схема оптико-пирометрического газоанализатора:
1 – источник ИК излучения; 2 – сферический отражатель; 3 – пирометрический приёмник;
4 – измерительная кювета; 5 – блок обработки сигнала; 6 – микропроцессор;
7, 8 – световой затвор; 9 – вторичный прибор; 10 – узкополосный фильтр (альтернатива А7)

Для обоснованного выбора лучшей схемы было проведено сравнение семи альтернативных схем (А1–А7) методом анализа иерархий. Оценка выполнялась по восьми критериям: количество оптических элементов; наличие движущихся элементов; число фильтров и пирометров; габариты; масса; стоимость; потребляемая мощность; погрешность измерения. В отличие от традиционного экспертного подхода, в данном случае метод анализа иерархий опирался не только на субъективные оценки, но и на достоверные количественные данные по каждому из критериев. Роль экспертов заключалась в ранжировании критериев по степени их влияния, что обеспечило объективность итоговых весов.

Итоговые веса критериев и альтернатив приведены в таблице. Наибольший интегральный вес (0,301) получен для альтернативы А7, что подтверждает рациональность предложенной схемы.

Таблица

Веса критериев альтернативных оптических схем для реализации газоанализатора

Альтернатива	А1	А2	А3	А4	А5	А6	А7
Вес	0,154	0,222	0,072	0,052	0,079	0,120	0,301

2. Параметрический анализ.

Математическая модель (статическая характеристика) предложенного оптико-пирометрического газоанализатора имеет вид:

$$E = UF(1 - p)(A_1 T_0^4 - A_2 T^4) e^{-\epsilon \lambda C l},$$

где E – электродвижущая сила (ЭДС) на пирометрическом приемнике (батарея термопар); U – коэффициент усиления блока обработки сигнала; p – потери излучения при отражении от поверхностей оптических элементов; F – температурный коэффициент пирометрического приемника; A_1, A_2 – коэффициенты поглощения в оптических элементах; T_0, T – температуры источника ИК-излучения и излучения после прохождения измерительной кюветы; ε_λ – коэффициент поглощения анализируемого газа на длине волны излучения λ ; l – длина оптического пути в кювете; C – концентрация анализируемого компонента в газе.

Проведенный метрологический анализ позволил получить обобщенные выражения для чувствительности и СКП измерений:

$$S = -UF(1-p)(A_1T_0^4 - A_2T^4)\varepsilon_\lambda l e^{-\varepsilon_\lambda Cl},$$

$$\sigma E = \sigma U + \sigma F + \frac{A_1T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \sigma A_1 + \frac{A_2T^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \sigma A_2 + \frac{4T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \sigma T_0 +$$

$$+ \frac{4T_1^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \sigma T_1 + \varepsilon_\lambda Cl \sigma \varepsilon_\lambda + \varepsilon_\lambda Cl \sigma l + \sigma_\xi, \quad (2)$$

где $\sigma_K, \sigma_M, \sigma_r, \sigma_{A1}, \sigma_{A2}, \sigma_{T0}, \sigma_{T1}, \sigma_{\varepsilon_\lambda}, \sigma_l, \sigma_\xi$ – СКП соответствующих неинформативных параметров.

Чувствительность S оптико-пирометрического газоанализатора имеет нелинейный характер, что является следствием действия закона Бугера-Ламберта-Бера и типично для СИ данного типа. Влияние этой нелинейности может быть снижено путем ограничения диапазона измерений, стабилизации температуры оптических элементов или использованием микропроцессорной коррекции выходного сигнала.

Из анализа выражения (2) следует, что СКП прибора формируется за счет аддитивной (первое, второе, седьмое, восьмое и девятое слагаемые) и мультипликативной (третье – шестое слагаемые) составляющих. Такой характер распределения ошибок указывает на то, что основное влияние на итоговую неопределенность оказывают параметры, входящие в экспоненциальную зависимость термоЭДС: длина оптического пути луча в анализируемой среде l , коэффициент поглощения ε_λ и концентрация измеряемого газа C . Оптимизация указанных параметров выполняется на этапе параметрического проектирования и направлена на достижение минимальной СКП при сохранении требуемой чувствительности и допустимых затрат. Для этого подбирают такие значения длины оптического пути и длины волны излучения, которые обеспечивают оптимальное значение произведения $\varepsilon_\lambda l$ в пределах рабочего диапазона концентраций. Такое сочетание исключает насыщение сигнала и снижает влияние температурных и спектральных шумов. Дополнительно корректируются характеристики оптических фильтров, геометрия кюветы и режим обработки сигнала, что позволяет уменьшить влияние мультипликативных составляющих погрешности. В совокупности эти меры обеспечивают выполнение критерия «ущерб-СКП» и снижение вероятности пропуска опасных концентраций при рациональных метрологических параметрах прибора.

3. Экономическая оценка.

Экономический анализ показал, что себестоимость серийного производства предложенного прибора (при выпуске до 100 шт. в месяц) составляет порядка 12,5 тыс. руб., тогда как ближайший отечественный аналог – ГИАМ-29М-4 имеет цену около 200 тыс. руб., а импортный Dräger X-am 2500 – более 450 тыс. руб. Таким образом, стоимость предложенного газоанализатора ниже в 7–27 раз, при сохранении функциональных характеристик и повышенной надежности.

Разработанная методика обладает научной новизной, заключающейся в интеграции структурно-параметрической и экономической оптимизации проектирования СИ с учетом их влияния на уровень потенциального ущерба, что принципиально отличает ее от известных

подходов, ориентированных преимущественно на соответствие нормативным требованиям и метрологическим характеристикам. В отличие от существующих методик, предложенный подход включает многокритериальный выбор с применением метода анализа иерархий, математическое моделирование метрологических характеристик СИ на этапе структурной и параметрической оптимизации, а также формализованную экономическую оценку эффективности на основе критерия «ущерб-СКП», что обеспечивает рациональное распределение ресурсов при проектировании и модернизации СИ в условиях ограниченного бюджета.

Заключение

Разработана методика проектирования средств измерений для систем мониторинга и контроля, основанная на критерии взаимосвязи «ущерб-СКП». Данный критерий позволяет количественно оценивать влияние метрологических параметров на уровень техногенного риска и решать как прямую, так и обратную задачу оптимизации.

Научная новизна работы заключается в формализации зависимости между средней квадратической погрешностью измерений и уровнем техногенного риска, что позволило впервые использовать соотношение «ущерб-СКП» в качестве критерия проектирования. Это обеспечивает переход от эмпирического выбора метрологических характеристик к формализованному управлению риском средствами метрологии.

В отличие от традиционных подходов, предложенная методика обеспечивает согласованное рассмотрение метрологических, конструктивных и экономических факторов в единой системе критериев, что позволяет обосновывать выбор конфигурации прибора и допустимого уровня риска при неопределенности исходных данных и ограничениях по ресурсам.

Апробация методики на примере проектировании оптико-пирометрического газоанализатора подтвердила ее практическую эффективность: предложенная структура позволила снизить себестоимость прибора в 7–27 раз при сохранении метрологических характеристик и повышении надежности. Математическое моделирование показало, что наибольшее влияние на итоговую неопределенность оказывают параметры, входящие в экспоненциальную зависимость термоЭДС: длина измерительной кюветы, коэффициент поглощения и концентрация газа. Их оптимизация в рамках критерия «ущерб-СКП» обеспечивает минимизацию риска при рациональном использовании ресурсов.

Разработанный подход формирует основу для интеграции риск-ориентированных принципов в цифровые процессы проектирования и риск-менеджмента промышленных предприятий, обеспечивая переход от формального проектирования приборов к целенаправленному управлению метрологическими характеристиками средств измерений.

Список источников

1. Гуменюк В.И., Ломасов В.Н. Радиационная, химическая и биологическая безопасность. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2016. 347 с.
2. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
3. Фурсова Т.В., Фатеев К.В. Износ основных фондов на предприятиях России как проблема реализации программы импортозамещения // Вестник МФЮА. 2024. № 1. С. 209–216.
4. Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory / M. Szostak [et al.] // Sensors. 2021. Vol. 21. № 5. Article 1728.
5. Machine Learning – Enabled Smart Sensor Systems // ResearchGate. 2019.
6. Self calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: a reference survey / J.M. Barceló Ordinas [et al.] // Ad Hoc Networks. 2019. Vol. 88. P. 142–159.

7. MathWorks Blog. Virtual Sensors with AI and Model Based Design MathWorks Blogs: Deep Learning. 2023.
8. AI-Driven Sensing Technology: Review // *Sensors*. 2024. № 24 (10). Article 2958.
9. Hardware for machine learning: challenges and opportunities / Z. Wang [et al.]. 2016.
10. Гарелина С.А. Снижение риска чрезвычайных ситуаций на производственных объектах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты образования. 2023. № 4 (59). С. 30–42.
11. Гарелина С.А., Гусев А.Л., Захарян Р.А. Основы разработки оптико-пиromетрического газоанализатора // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2023. № 12. С. 12–18.

References

1. Gumenyuk V.I., Lomasov V.N. Radiacionnaya, himicheskaya i biologicheskaya bezopasnost'. SPb.: Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet, 2016. 347 s.
2. Akimov V.A., Lesnyh V.V., Radaev N.N. Osnovy analiza i upravleniya riskom v prirodnoj i tekhnogennoj sferah. M.: Delovoj ekspress, 2004. 352 s.
3. Fursova T.V., Fateev K.V. Iznos osnovnyh fondov na predpriyatiyah Rossii kak problema realizacii programmy importozameshcheniya // *Vestnik MFYUA*. 2024. № 1. S. 209–216.
4. Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory / M. Szostak [et al.] // *Sensors*. 2021. Vol. 21. № 5. Article 1728.
5. Machine Learning – Enabled Smart Sensor Systems // ResearchGate. 2019.
6. Self calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: a reference survey / J.M. Barceló Ordinas [et al.] // *Ad Hoc Networks*. 2019. Vol. 88. P. 142–159.
7. MathWorks Blog. Virtual Sensors with AI and Model Based Design MathWorks Blogs: Deep Learning. 2023.
8. AI-Driven Sensing Technology: Review // *Sensors*. 2024. № 24 (10). Article 2958.
9. Hardware for machine learning: challenges and opportunities / Z. Wang [et al.]. 2016.
10. Garelina S.A. Snizhenie riska chrezvychajnyh situacij na proizvodstvennyh ob"ektah // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity obrazovaniya. 2023. № 4 (59). S. 30–42.
11. Garelina S.A., Gusev A.L., Zaharyan R.A. Osnovy razrabotki optiko-pirometricheskogo gazoanalizatora // Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEЕ). 2023. № 12. S. 12–18.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 30.09.2025; одобрена после рецензирования: 29.10.2025;
принята к публикации: 05.11.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 30.09.2025; approved after review: 29.10.2025;
accepted for publication: 05.11.2025

Информация об авторах:

Светлана Александровна Гарелина, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1 А), кандидат технических наук, доцент, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0784-3003>, SPIN-код: 8591-0495

Актерский Юрий Евгеньевич, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор военных наук, профессор, e-mail: aue2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5767-7462>, SPIN-код: 7387-1442

Information about the authors:

Garelina Svetlana A., professor of the department of mechanics and engineering graphics of Civil defence academy EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bldg. 1 A), candidate of technical sciences, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8591-0495

Akterskiy Yury E., professor of the department of fire safety of buildings and automated fire extinguishing systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of military sciences, professor, e-mail: aue2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5767-7462>, SPIN: 7387-1442