

Научная статья

УДК 614.844; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Синешук Юрий Иванович;

Терехин Сергей Николаевич;

✉ Немчинов Матвей Сергеевич.

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

✉ matvejnemchinow@gmail.com

Аннотация. Рассматривается надежность системы роботизированной установки пожаротушения при обеспечении защиты на объектах топливно-энергетического комплекса. В настоящее время идет активное внедрение и использование автоматических систем пожаротушения на базе пожарных роботов. Интенсивное развитие пожарной робототехники происходит вследствие широкой востребованности в них из-за высокой эффективности тушения пожаров за счет быстрого обнаружения загорания в ранней стадии и гарантированного подавления очага в самом начале его возникновения полным расходом огнетушащего вещества. Роботизированная установка пожаротушения функционирует в автоматическом позиционном или контурно-программном режиме сканирования. Для взрывоопасных объектов нефтяной и газовой промышленности на наружных установках, сырьевых, товарных и промежуточных складах, сливо-наливных эстакадах первостепенное значение имеет раннее обнаружение аварийных утечек и проливов, а также предупредительные и локальные меры по осаждению, охлаждению, тушению в ранней стадии, чтобы не допустить развития аварийной ситуации. Ввиду высокой опасности для человека все чаще используют безлюдные технологии, а для пожарной защиты – пожарные роботы. Авторами проводится анализ различных способов резервирования системы, а также способов соединения отдельных элементов, даются рекомендации по повышению надежности системы.

Ключевые слова: пожарные роботы, роботизированные установки пожаротушения, автоматические установки пожаротушения, надежность, безотказность

Для цитирования: Синешук Ю.И., Терехин С.Н., Немчинов М.С. Способы повышения надежности роботизированных установок пожаротушения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 120–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

Scientific article

METHODS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS**Sineshchuk Yuri I.;****Terekhin Sergey N.;****✉Nemchinov Matvey S.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia****✉matvejnemchinow@gmail.com**

Abstract. This article examines the reliability of a robotic fire extinguishing system while providing protection at facilities of the fuel and energy complex. Currently, there is an active introduction and use of automatic fire extinguishing systems based on fire robots. The strong development of fire robotics is due to the great need for them due to the effectiveness of fire extinguishing due to the rapid detection of ignition at an early stage and the guaranteed suppression of the hearth at the very beginning of its occurrence by the full consumption of extinguishing agent. The control panel provides operation in automatic positional or contour-software scanning. Early detection of emergency leaks and spills, as well as preventive and local measures for precipitation, cooling, and extinguishing at an early stage, is of paramount importance for explosive objects of the oil and gas industry in outdoor installations, raw materials, commodity and intermediate warehouses, and overflow ramps. Due to the high danger to humans, unmanned technologies are increasingly being used, and fire robots are being used for fire protection. An analysis of various ways of reserving the system is carried out, as well as ways of connecting individual elements, recommendations are given to improve the reliability of the system.

Keywords: firefighting robots, robotic fire extinguishing systems, automatic fire extinguishing systems, reliability, reliability

For citation: Sineshchuk Yu.I., Terekhin S.N., Nemchinov M.S. Methods for improving the reliability of robotic fire extinguishing systems // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 120–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-120-129

Введение

В настоящее время роботизированные установки пожаротушения (РУП) все активнее используются на различных объектах. РУП при тушении должна обеспечивать подачу огнетушащего вещества на определённую площадь по заданным координатам, в заданное время, обеспечивая требуемую интенсивность орошения [1, 2]. Основным преимуществом пожарных роботов (ПР) является возможность выбора алгоритма и принципа работы системы управления, что позволяет учитывать особенности проходящих процессов и параметры защищаемых объектов [3–6]. Уже значительный период времени РУП используются на защите объектов топливно-энергетического комплекса.

Обеспечение объекта автоматическими установками пожаротушения не гарантирует полную безопасность и исключение возможности возникновения и распространения пожара. Все это связано с показателями надёжности, которые необходимо учитывать при выборе вида автоматических установок пожаротушения.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения системы и условий ее применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [7, 8]. Основной задачей работы будет являться решение вопроса повышения надёжности РУП.

Основными показателями надёжности невосстанавливаемых систем являются:

- вероятность безотказной работы;
- вероятность отказа;
- плотность распределения вероятности отказа;

- интенсивность отказов;
- среднее время наработки до первого отказа [9].

Вероятность безотказной работы – $P(t)$, наиболее часто используемый показатель, который отражает вероятность того, что в пределах заданного времени (заданной наработки) отказ объекта не произойдет^{1,2}. Определяется по формуле:

$$P(t) = P(t_0 > t).$$

Для рассматриваемого объекта отказ и отсутствие отказа в одно и то же время t представляет полную группу несовместных событий:

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Типовая функциональная зависимость $P(t)$ и $Q(t)$ представлена на рис. 1.

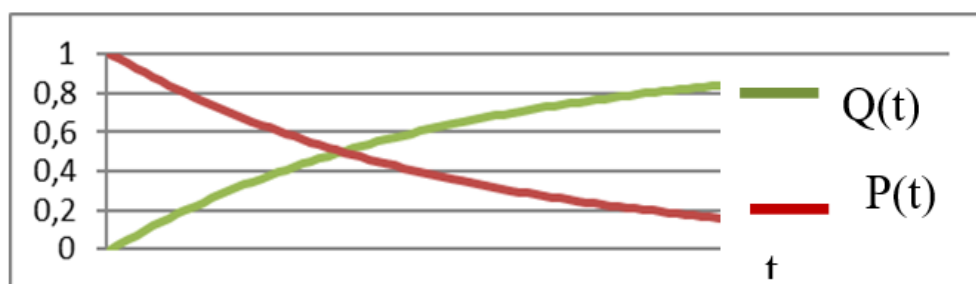


Рис. 1. Функциональная зависимость $P(t)$ и $Q(t)$

При расчетах показателей надежности широко используется так называемая основная формула надежности, связывающая вероятность безотказной работы и интенсивность отказов:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Статистические данные об отказах типовых элементов свидетельствуют о том, что время их работы для нормального периода эксплуатации, в течение которого $\lambda(t) = \text{const}$, подчиняется экспоненциальному закону распределения. Тогда выражение для вычисления вероятности безотказной работы выглядит, как показано в формуле:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda(t)}.$$

Низкие значения показателей надежности могут привести к серьезным экономическим, социальным и экологическим последствиям [10, 11]. Поэтому повышение показателей надежности автоматических установок пожаротушения, в частности РУП, являются одной из главных задач в системе обеспечения пожарной безопасности.

Опыт эксплуатации очень многих электронных приборов и значительного количества электромеханической аппаратуры показывает, что для них характерны три вида зависимостей интенсивности отказов от времени, соответствующих трем периодам жизни этих устройств (рис. 2).

¹ ГОСТ Р 27.102–2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

² ГОСТ 27.003–2016. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»



Рис. 2. График интенсивности отказов

Методы исследования

Оценить эффективность того или иного метода повышения надежности возможно только тогда, когда известно, как влияют основные характеристики этого метода на количественные характеристики надежности.

В общем случае методы повышения надежности могут быть сведены к следующим:

- резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств, сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций;
- уменьшение интенсивности отказа – заключается в упрощении системы, выборе наиболее надежных элементов, облегчении режимов работы, тренировке элементов и системы;
- уменьшению времени восстановления – достигается уменьшением отказов, уменьшением времени ремонта, повышением доступности элементов и системы к ремонту.

При этом метод уменьшения времени непрерывной работы не может использоваться для систем круглосуточного контроля. В рамках данной статьи рассмотрим эти методы с учетом получения значений надежности системы исходя из расчетов.

Реализация указанных методов может осуществляться либо при проектировании, либо при изготовлении, либо в процессе эксплуатации систем. Для повышения надежности РУП необходимо провести анализ и выбор наиболее эффективной и надежной системы путем расчета надежности отдельных элементов исходя из вида соединений.

Системы с резервированием (отказоустойчивые системы) разрабатываются таким образом, чтобы минимизировать воздействие деструктивных факторов и сохранять свойства надежности для выполнения установленных алгоритмом функционирования системы задач даже при выходе из строя (отказе) отдельных элементов системы.

Результаты и обсуждение

Роботизированные установки пожаротушения представляют собой многокомпонентную, технически сложную систему.

В состав роботизированной установки пожаротушения входят как минимум два пожарных робота, защищающих общее пространство, а также составные элементы системы (рис. 3).

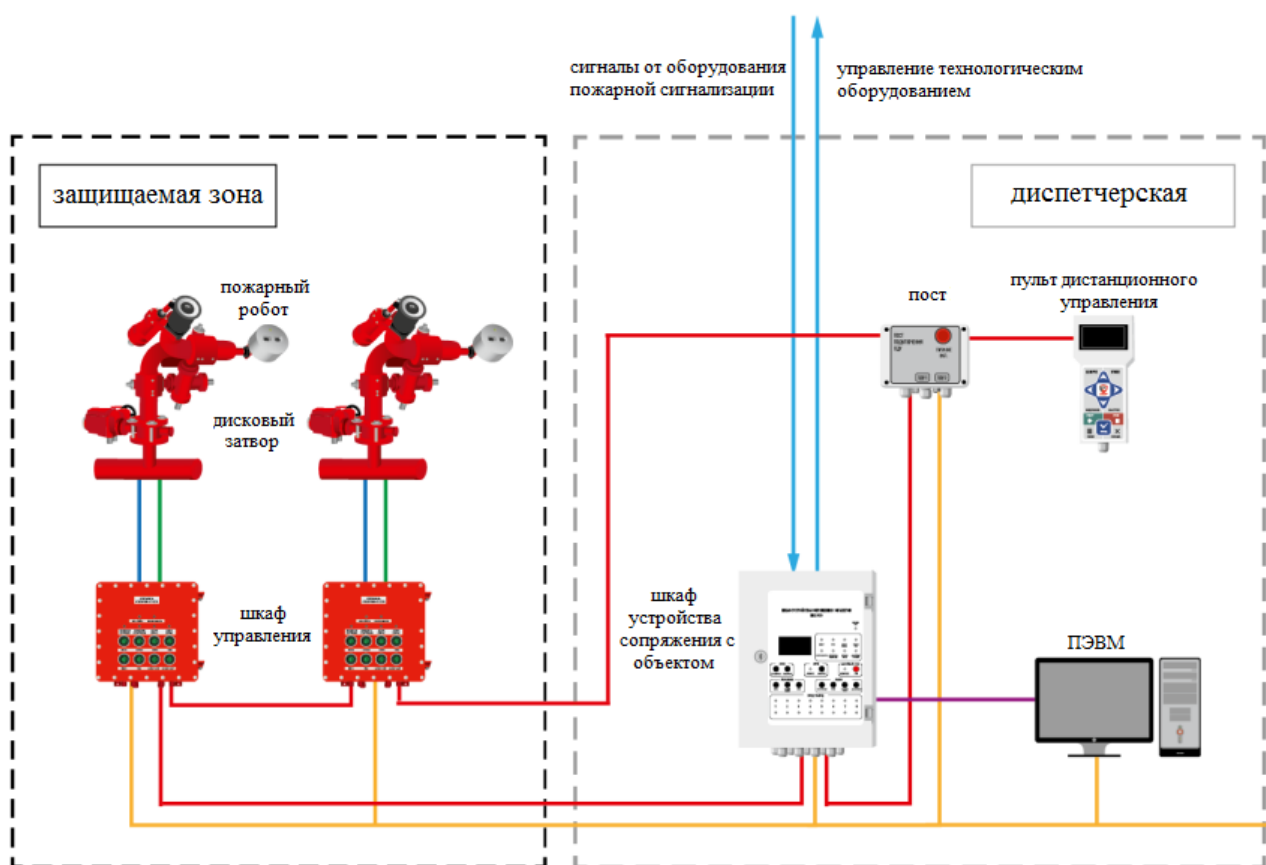


Рис. 3. Структурная схема РУП

Одним из ключевых элементов РУП является системообразующий блок управления РУП – шкаф устройства сопряжения с объектом (ШКУ-УСО), который выполняет ряд важных функций, являясь по своей сути центром по обработке информации и передачи сигналов на исполнительные устройства.

На данный момент к надежности и отказоустойчивости систем РУП применяются следующие требования:

- приборы управления должны быть рассчитаны на непрерывную работу;
- время восстановления не более 6 ч, что может быть неприемлемо в критических ситуациях;
- требования по резервированию формулируются только к резервированию подсистемы электропитания и насосным группам в составе пожарной насосной станции (без учета системы управления насосами);
- вероятность безотказной работы ствола за цикл не менее 0,993, при контроле 554 циклов одноступенчатым методом.

Несмотря на отсутствие нормативных требований по применению методов обеспечения надежности в отношении отдельных элементов РУП, потребность в их резервировании для обеспечения безотказной работы системы приобретает особую актуальность на объектах топливно-энергетического комплекса.

Для обеспечения защиты резервуара с хранением нефтепродуктов используем четыре пожарных робота ПР-ЛСД-С70 У-Ех-ИК-ТВ во взрывозащищенном исполнении, что позволяет своевременно обнаружить опасный уровень теплового воздействия от внешних очагов пожара и обеспечить необходимую и достаточную защиту без привлечения значительных оперативных средств на время, необходимое для ликвидации источников теплового воздействия (рис. 4).

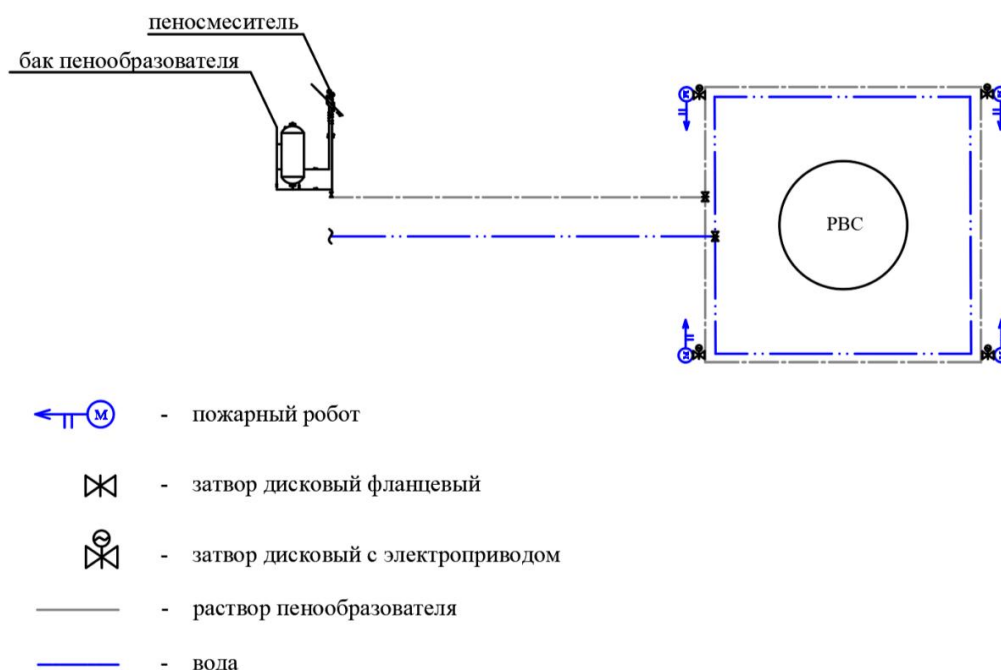


Рис. 4. Схема защиты резервуара

Пожарные роботы соединены кольцевой линией связи, обеспечивающей передачу управляющих сигналов даже при возникновении единичной неисправности. Отсюда возникает потребность в повышении надежности отдельных элементов РУП:

1. Надежность пожарных роботов.

Для замены отказавшего элемента достаточно иметь резервный элемент на складе. Однако продолжительность ручной замены составляет часы, что для многих систем недопустимо долго – такая ситуация характерна для систем без резервирования, где показатель надежности более низкий и для данного случая из четырех пожарных роботов равен 0,972 (рис. 5).

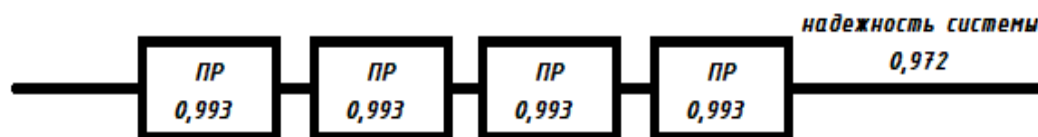


Рис. 5. Система без резервирования

Сократить время вынужденного простоя позволяет применение узлов системы с возможностью «горячей замены», при условии наличия развитой системы диагностики неисправности. Горячее резервирование с замещением – резервирование, при котором переход с основного элемента на резервный происходит без потери производительности. Такая необходимость существует на всех пожарных роботах в защищаемой зоне, так как при условном пожаре в резервуаре время реагирования и время начала тушения должно минимизироваться.

Если при получении сигнала от ШК-УСО и передаче его РУП на тушение назначаются два ПР, находящихся ближе всех к очагу возгорания, а в случае выхода из строя одного пожарного робота, его функции возьмет на себя ближайший ПР, пребывающий в это время уже в «боевом» режиме, или резервная пара роботов, то в этом случае мы приходим к формам параллельно – последовательного, либо последовательно – параллельного соединения элементов.

Тогда для первого рода соединений расчетные выражения будут выглядеть следующим образом:

$$P = (1 - (1 - P_1)(1 - P_2))(1 - (1 - P_3)(1 - P_4)) = 0,9999.$$

А для второй формы соединений получим значение:

$$P = (1 - (1 - P_1 * P_3)(1 - P_2 * P_4)) = 0,9998.$$

Также возможен вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов ($m < n$).

2. Надежность ПДУ-П.

В данном случае используется холодное резервирование, которое заключается в переходе резервного элемента в активный режим работы по мере выхода из строя предыдущего работающего устройства. Выход из строя пульта управления оперативно замещается другим ПДУ-П, который находится в помещении оператора либо на защищаемой территории. Помимо этого система РУП сможет автономно существовать и без ПДУ-П, выполняя свои задачи по локализации/ликвидации пожара. Следовательно, еще один элемент РУП применяется с резервированием путем замены элемента.

3. Надежность ШК-УСО.

В настоящее время системообразующим элементом РУП является центральный блок управления ШК-УСО. Управляющий модуль ШК-УСО не имеет резервирования, и выход его из строя приводит к невозможности РУП существовать в качестве автоматической системы пожаротушения и выполнять свою основную функцию: автоматическое тушение очага пожара.

В связи с этим возникает явная проблема в автономной работе РУП. Шкаф устройства сопряжения с объектом, как было описано ранее, выполняет важнейшие задачи всей роботизированной установки пожаротушения, являясь диктующим элементом в этой системе. ШК-УСО должен иметь максимальные показатели надежности и отказоустойчивости. Этого можно добиться двумя решениями:

1. Резервирование ШК-УСО. Самый простой способ обеспечить высокие показатели надежности и отказоустойчивости путем включения в систему резервного ШК-УСО, но такое исполнение имеет ряд особенностей, осложняющих это решение.

Во-первых, возможно ошибочное переключение на резервную систему. Для этого при переключении по причине сбоя в системе контроля используют временной фильтр, который разрешает переключение только при условии, что состояние неисправности длится не менее установленного времени.

Во-вторых, в момент замещения резервный ШК-УСО должен иметь внутренние состояния, идентичные состояниям основного. Для быстрой синхронизации внутренних состояний потребуется применение специализированной скоростной шины синхронизации, которая будет усложнять систему.

В-третьих, исходя из вышеперечисленных пунктов, увеличивается и затраты на обеспечение системы РУП.

2. Упрощение системы (работа без ШК-УСО). Работа роботизированной установки пожаротушения без ШК-УСО осложняется тем, что необходимо возложить на какой-то элемент функции, которые выполнял ШК-УСО и тем самым этот элемент станет условным центром принятия решений. Для защиты как объекта ТЭК, так и любого другого объекта функционирует система противопожарной защиты (СППЗ). Ее основным элементом является прибор приёмно-контрольный и управления пожарный (ППКУП). То есть весь функционал ШК-УСО можно переложить на ППКУП, однако, еще в самом начале указывалось, что работа РУП может перепрограммироваться под определенные особенности объекта, то есть программное

обеспечение, которое создается для РУП, является индивидуальным и его тяжело дублировать на ППКУП для корректной работы всех систем СППЗ.

Тогда требуется другой путь решения данной проблемы, например, обособленная работа пожарных роботов на защищаемой территории. В примере системы РУП, состоящей из четырех ПР, защищающих резервуар, выбирается один «главствующий» в одной из пар ПР, обеспечивающий сбор и обработку информации на заданном участке и передачу команд другим ПР, находящимся под его ведением. В данном случае выход из строя ШК-УСО позволит не нагружать работу СППЗ и не проводить дополнительные сложные операции по перепрограммированию ППКУП, а передать все функциональные обязанности пожарным роботам, работающим по принципу иерархии. Тогда, при сбое в работе «главствующего» ПР, его обязанности перенимает резервный ПР и уже он выполняет все функции, которые изначально были возложены на ШК-УСО.

По сути, мы приходим к схеме классического параллельно-последовательного соединения, когда на объекте защиты допустимо функционирование хотя бы любых двух из четырех роботов. При таком техническом решении вероятность безотказной работы системы будет значительно повышаться и надежность системы будет более 0,999.

В связи с тем, что тема пожарной робототехники в нашей стране лишь набирает обороты, а конкретных требований надежности, предъявляемых к пожарным роботам, нет, то и предложенных ранее методов повышения надежности систем роботизированной установки пожаротушения не имеется. Таким образом, мы можем лишь сравнить эффективность представленного метода повышения надежности и безотказности систем на примере других объектов.

Выводы

Рассмотрев способы повышения надежности РУП, можем прийти к выводу, что использование системы с резервированием путем параллельно-последовательного соединения элементов повышает надежность и тем самым установка будет способна выполнять установленный ряд задач по обеспечению пожарной безопасности объекта с большей эффективностью, чем другие системы, выполняющие аналогичные функции.

Надежность как свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, следует рассматривать как один из основных критериев качества системы. Чем качественнее система, тем она надежнее, и наоборот. В связи с этим задача расчета, прогнозирования и повышения надежности сложных технических систем, к числу которых, несомненно, относятся и робототехнические системы, является исключительно актуальной.

Список источников

1. Система технического зрения для роботизированных установок пожаротушения / С.Г. Немчинов [и др.] // Экстремальная робототехника. 2022. № 1 (33). С. 51–56.
2. Gupta Brij B., Nedjah N. Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems // Algorithms, Applications, and Technologies. 2023. 276 p. DOI: 10.1201/9781003031352
3. Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения – современные технологии пожаротушения с российским приоритетом // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 5. С. 54–66. EDN YQUILQ. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66
4. Dhillon S. Robot system reliability and safety. A modern approach. LLC CRC Press, 2020. 212 p. DOI: 10.1201/b18388
5. Mitrevsk P., Plöger G., Lakemeyer G. Ontology-Assisted Generalisation of Robot Action Execution Knowledge // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 6763–6770. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636791

6. The evolution of robotics research / E. Garcia [и др.] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2007. P. 90–103.
7. Основы теории надежности: учеб. / А.В. Чепурин [и др.]. М.: Типография ПМГ, 2023. 232 с.
8. Mourtzis D., Tsoubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance // Electronics. 2023. 12 p. DOI: 10.3390/electronics12091999
9. Киселев В.В. Пути повышения надежности пожарной автомобильной техники // NovaInfo.Ru. 2020. № 114. С. 5–6.
10. Маткаримов Ш.А. Понятие надёжности в технике // Universum: технические науки. 2023. № 12-2 (117). С. 54–55. EDN KQSTUS. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16366
11. Friederich J.; Lazarova-Molnar S. Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production Systems // Procedia Comput. Sci. 2021. № 184. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.073

References

1. Sistema tekhnicheskogo zreniya dlya robotizirovannykh ustanovok pozharotusheniya / S.G. Nemchinov [i dr.] // Ekstremal'naya robototekhnika. 2022. № 1 (33). S. 51–56.
2. Gupta Brij B., Nedjah N. Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems // Algorithms, Applications, and Technologies. 2023. 276 p. DOI: 10.1201/9781003031352
3. Gorban' Yu.I., Carichenko S.G. Robotizirovannye ustanovki pozharotusheniya – sovremennye tekhnologii pozharotusheniya s rossijskim prioritetom // Pozharovzryvbezopasnost'. 2022. T. 31. № 5. S. 54–66. EDN YQUILQ. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66
4. Dhillon S. Robot system reliability and safety. A modern approach. LLC CRC Press, 2020. 212 p. DOI: 10.1201/b18388
5. Mitrevsk P., Plöger G., Lakemeyer G. Ontology-Assisted Generalisation of Robot Action Execution Knowledge // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 6763–6770. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636791
6. The evolution of robotics research / E. Garcia [i dr.] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2007. P. 90–103.
7. Osnovy teorii nadezhnosti: ucheb. / A.V. Chepurin [i dr.]. M.: Tipografiya PMG, 2023. 232 s.
8. Mourtzis D., Tsoubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance // Electronics. 2023. 12 p. DOI: 10.3390/electronics12091999
9. Kiselev V.V. Puti povysheniya nadezhnosti pozharnoj avtomobil'noj tekhniki // NovaInfo.Ru. 2020. № 114. S. 5–6.
10. Matkarimov Sh.A. Ponyatie nadyozhnosti v tekhnike // Universum: tekhnicheskie nauki. 2023. № 12-2 (117). S. 54–55. EDN KQSTUS. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16366
11. Friederich J.; Lazarova-Molnar S. Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production Systems // Procedia Comput. Sci. 2021. № 184. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.073

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 02.03.2026; одобрена после рецензирования: 06.04.2026;
принята к публикации: 12.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 02.03.2026; approved after review: 06.04.2026;
accepted for publication: 12.05.2026

Информация об авторах:

Синешук Юрий Иванович, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: sinegal53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2591-2850>, SPIN: 4663-4378

Терехин Сергей Николаевич, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: expert_terehin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1478-8129>, SPIN: 9342-2440

Немчинов Матвей Сергеевич, начальник кабинета кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, SPIN: 5286-7616, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>

Information about the authors:

Sineshchuk Yuri I., professor of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: sinegal53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2591-2850>, SPIN: 4663-4378

Terekhin Sergey N., professor of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: expert_terehin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1478-8129>, SPIN: 9342-2440

Nemchinov Matvey S., head of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, SPIN: 5286-7616, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>