

**федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»**



*На правах рукописи*

**ГУСЕВА АЛЁНА ИГОРЕВНА**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ВОЗГОРАНИИ НА СУДНЕ**

Специальность: 05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие  
системы (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Малыхина Галина Федоровна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Грязин Дмитрий Геннадиевич

доктор технических наук, профессор  
Антонюк Евгений Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Крыловский  
государственный научный центр»

Защита состоится 10 февраля 2021 г. в 14 часов 00 минут  
на заседании Диссертационного совета У.05.11.16 при федеральном  
государственном автономном образовательном учреждении высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу:  
Политехническая ул., д. 29, а. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
У.05.11.16



Семенов К. К.

## I. Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** Информационно-измерительная система представляет собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю в требуемом виде, либо автоматического осуществления логических функций – контроля, диагностики, идентификации. В настоящее время имеющиеся на каждом судне системы пожарной сигнализации (СПС) предназначены только для сигнализации о начавшемся пожаре. Так как датчики, установленные в таких системах, работают по пороговому принципу, то есть по сути своей являются извещателями, то они не могут быть рассмотрены как часть информационно-измерительной системы. Пороги для извещателей, как правило, устанавливаются заранее и достаточно высокими, чтобы исключить ложные срабатывания. Это приводит к увеличению времени реакции на возникновение возгорания. При замене извещателей, работающих по пороговому принципу, многопараметрическими датчиками, позволяющими получать значение величин, а не только факт превышения ими установленного порога, появится возможность интеллектуальной обработки передаваемых данных и, как следствие, увеличение эффективности самой системы. Под многопараметрическими датчиками будем понимать устройства, объединяющие в своем корпусе более одного измерительного прибора.

Кроме того, существующие системы не учитывают особенности помещения, расположение отопления и вентиляции, расположение вероятных источников возникновения возгорания, поэтому целесообразно строить модель помещения на этапе проектирования противопожарной системы и на ее основе рассчитывать расположение датчиков.

Набор извещателей по стандарту устанавливается на потолке, при необходимости, такие извещатели могут быть установлены и на стенах. Все установленные извещатели должны контролировать всю защищаемую область помещения. Если дым от начавшегося возгорания будет распространяться в мертвой зоне, то огонь будет распространяться до тех пор, пока повышение температуры или уменьшение видимости (в случае наличия соответствующих извещателей) не достигнет датчиков, но причиненный ущерб будет уже значительно больше. При наличии сильных потоков воздуха в помещении, концентрация дыма под потолком может не достичь порогового значения, что приведет к отсутствию реакции на начало пожара со стороны дымовых извещателей. С температурными извещателями такая ситуация тоже возможна. Стоит заметить, что при распространении пожара до определенного масштаба реакция извещателей все же последует, но время уже будет упущено. При использовании вместо извещателей измерительных многопараметрических устройств и включения их в информационно-измерительную систему можно увеличить скорость ее срабатывания даже в ситуациях, описанных выше. Действующие нормы, указанные в своде правил СП 5.13130.2009, регламентируют

только количество и тип средств технического контроля для помещения, но не указывают необходимость учитывать особенности помещения при их расстановке.

Очевидно, что для повышения эффективности обеспечения пожарной безопасности судов необходимо снизить вероятность возникновения возгорания и автоматизировать процесс контроля пожарной опасности, модернизировав существующую противопожарную систему в информационно-измерительную систему с многопараметрическими датчиками и интеллектуальной обработкой информации, получаемой с них. В большом помещении с разнообразным типом угроз, как, например, машинное отделение, устанавливается автоматическая система пожаротушения, которая может быть включена только в части помещения. На данный момент такая система включается только в ручном режиме, соответственно человек должен определить место возгорания и тип источника возгорания, чтобы запустить систему тушения. Это требует больше времени, чем автоматическое определение этих факторов, а, следовательно, и последствия пожара будут масштабнее.

Поэтому на сегодняшний день актуальным является разработка новых методов и алгоритмов, позволяющих создать интеллектуальную противопожарную систему на судах.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов и алгоритмов для интеллектуальной системы противопожарной безопасности на судах, основанной на многопараметрических устройствах, которая обнаруживает пожар на ранних стадиях и определяет тип источника возгорания и место возникновения пожара.

Для реализации цели были поставлены следующие **задачи**:

- разработать математические модели, позволяющие получить данные о процессах, происходящих в помещении при возникновении пожара и реакции на эти процессы многопараметрических датчиков, расположенных в помещении. Оценить адекватность применяемой модели, сравнив ее с натурным экспериментом.
- построить алгоритм, рассчитывающий оптимальное расположение датчиков в помещении, учитывающих индивидуальные характеристики и вероятности возникновения возгорания в различных его частях;
- разработать модель системы, позволяющей реагировать на возникновения возгорания на ранних стадиях, определять зону возгорания и тип источника возгорания;

**Объект исследований.** Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС) в части методов усовершенствования противопожарных систем на судах.

**Предмет исследований.** Процесс построения противопожарных систем, особенности существующих систем и пути их усовершенствования.

**Методы исследования.** В работе использованы методы математического моделирования пожара, методы оптимизации, искусственные нейронные сети с задержкой на входе, сиамские сети, байесовская сеть.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- модель системы возгорания, включающая модель пожара и модель датчиков;
- разработана модификация генетического алгоритма для решения задачи оптимального расположения датчиков в помещении;
- предложен нейросетевой алгоритм определения начала возгорания, зоны и типа источника возгорания на основании показаний многопараметрических датчиков.

**Теоретическая значимость** работы выражается в следующих алгоритмах:

- модифицированный генетический алгоритм определения оптимального расположения многопараметрических датчиков в помещении;
- система связанных алгоритмов, включающих алгоритм, определяющий начало возникновения возгорания, место возгорания, а также тип источника возгорания.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

- разработана модель измерительной системы, которая может быть использована для следующих задач:
  - испытания проектируемых противопожарных систем;
  - обучения нейронных сетей, при построении алгоритмов интеллектуальных противопожарных систем;
  - прогнозирования развития пожара и реакции многопараметрических датчиков, расположенных в помещении.
- разработано программное обеспечение, позволяющее по данным с многопараметрических датчиков, полученным с помощью модели или реального объекта и характеристикам помещения рассчитывать оптимальное положение датчиков в помещении;
- разработаны алгоритмы системы, позволяющие в реальном времени обрабатывать данные, получаемые с многопараметрических датчиков и принимать решение о начале пожара и о его характеристиках (типе источника возгорания и месте его расположения);

**На защиту выносятся** следующие положения:

- модифицированный генетический алгоритм позволяет рассчитать оптимальное расположение датчиков в помещении учитывая его физические особенности и назначение. Датчики, расположенные в рассчитанных алгоритмом местах, обнаруживают пожар быстрее, чем датчики, расположенные равномерно;
- алгоритмы интеллектуальной системы, состоящей из трех независимых подсистем, позволяют обнаруживать пожар на начальной стадии, при переходе возгорания в пожар, а также определять тип источника возгорания и зону его расположения

**Апробация работы.** Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, были представлены и одобрены на следующих конференциях: «Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Комплексная защита объектов информатизации – 2016», «Четвертая международная научно-практической конференция «Имитационное и комплексное

моделирование морской техники и морских транспортных систем», «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Electronic resource. 2017», «The II Convergent cognitive information technologies (Convergent'2017) international scientific conference, Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research II. Neural informatics Studies in Computational Intelligence», «The III Convergent cognitive information technologies (Convergent'2018) international scientific conference (2018) », «Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research II. Neural informatics Studies in Computational Intelligence (2019) », «International Scientific-Practical Conference Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction. Pskov. 2019». Практическая применимость результатов работа подтверждена актом о внедрении, выданном обществом с ограниченной ответственностью «Аргус-Спектр» и справкой о внедрении в научную деятельность высшей школы киберфизической систем и управления Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 6 статей, опубликованных в изданиях индексируемых в Scopus, 2 статьи опубликованные в изданиях, индексируемых в Web of Science, 6 статей индексируемых в РИНЦ.

**Личный вклад автора.** Все результаты, полученные в диссертации, были получены автором самостоятельно.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности «05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (промышленность)». Область исследований:

- методы и системы программного и информационного обеспечения процессов отработки и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем.

## **II. Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, на основе существующих регламентов и сводов правил. Устанавливаются цели и задачи исследования, а также научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Формулируются выносимые на защиту положения.

**В первой главе** приведен обзор возможностей современных противопожарных систем, основных способов их построения и расчета характеристик. Для того, чтобы разработать методы, позволяющие улучшить системы противопожарной безопасности, необходимо оценить типы пожаров на судах и их классификацию. А также рассмотреть противопожарные системы и их применимость к различным типам пожара. Объединим классификацию пожаров и способы их тушения в схему на рис.1.



*Рисунок 1 – Классификация типов возгораний на судне и соответствующих методов тушения*

Таким образом, при проектировании противопожарной системы необходимо определять тип источника возгорания для выбора оптимальной системы пожаротушения. Кроме того, применение многопараметрических датчиков, таких как, например, MAGIC.SENSOC 310 GLT от компании BOSCH, позволит получать необходимую информацию для усовершенствованных противопожарных систем.

Для разработки противопожарных систем часто используют компьютерное моделирование и проведение огневых испытаний на тестовых полигонах. Это позволяет достаточно точно предсказать распространение огня и возможные последствия. Рассмотрим три основных метода компьютерного моделирования, их характеристики и применимость к различным типам задач.

- интегральный метод рассчитывает состояния газовой среды в помещении на основе средних значений по всему объему помещения;
- при расчете зонным методом рассматриваем два слоя в помещении: верхний слой продуктов горения (задымленная зона) и нижний слоя невозмущенного воздуха (свободная зона). Более подробную информацию о структуре пожара, чем осредненные по зоне значения получить при таком моделировании невозможно;
- основная идея полевого метода заключается в выделении большого количества зон маленьких объемов, никак не связанных со структурой потока. Таким образом, определяем зависимость величин ОФП от времени:  $ОФП_m = f(x, y, z, t)$ . Этот метод подходит для расчетов точных моделей, но требует значительных вычислительных ресурсов.

Так как для решения поставленной задачи была необходима детализация и была возможность выполнить расчет на суперкомпьютере с пиковой

производительностью 943 ТФлопс, имеющем 14 ядер по 2.6 ГГц каждое и 64 ГБ оперативной памяти DDR4, то выбран для расчета полевой метод, а в качестве программного обеспечения, его реализующего, программа Fire Dynamics Simulator(FDS).

Таким образом, причины возникновения пожара и их классификация должны быть учтены при проектировании противопожарной системы. От типа источника возгорания зависит выбор системы тушения, вследствие этого следует разработать алгоритм, определяющий тип источника возгорания. Включение системы сигнализации зависит от места расположения источника пожара, поэтому целесообразно спроектировать алгоритм, позволяющий это рассчитывать. Выбранный метод моделирования пожара – полевой позволяет смоделировать пожар с нужной точностью. Программа для моделирования FDS подходит для выполнения поставленной задачи.

**Вторая глава** посвящена разработке компьютерной модели возгорания на судне на основе полевого моделирования в программе FDS с учетом характеристик датчиков, выполнению моделирования на суперкомпьютере (определение числа кластеров для векторизации - распараллеливания), визуализации возгорания, построению модели измерительной системы и оценке влияния случайной погрешности на алгоритмы интеллектуальной противопожарной системы, сравнению результатов компьютерного моделирования и проведенных огневых испытаний. Полевая модель пожара использует следующие уравнения.

Уравнение переноса массы:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla\rho u = m_b^m, \quad (1)$$

где  $m_b^m$  – скорость изменения массы в выделенном объеме, вызванного испарением капель и другими факторами,  $\rho$  – плотность переносимой массы,  $t$  – время,  $u$  – скорость.

Закон сохранения импульса:

$$\frac{d}{dt}(\rho u) + \nabla\rho uu + \nabla p = pg + f_b + \nabla\tau_{ij}, \quad (2)$$

где  $uu$  – тензор второго порядка,  $f_b$  – внешние силы, вызванные трением с каплями жидкости и др. факторами,  $\tau_{ij}$  – тензор напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta(\nabla u) \right); \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{du_i}{dx_i} + \frac{du_j}{dx_j} \right); \quad i, j = 1, 2, 3,$$

Уравнение переноса энергии:



$$\frac{d}{dt}(\rho h_s) + \nabla \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + q'' - q_b'' - \nabla q' + \varepsilon, \quad (4)$$

где  $h_s$  – явная энтальпия,  $\frac{Dp}{Dt} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p$  – материальная производная,  $q''$  – скорость образования теплота на единицу объема за счет химических реакций,  $q_b''$  – скорость поглощения теплоты за счет испарения,  $q'$  отражает тепловые потоки вследствие теплопроводности и излучения:

$$q' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + q_r'', \quad (5)$$

где  $Y_{\alpha}$  – массовая доля газовой составляющей  $\alpha$ ,  $D_{\alpha}$  – коэффициент диффузии газовой составляющей  $\alpha$ ,  $k$  – теплопроводность.

Уравнение состояния:

$$p = \frac{\rho R T}{\bar{W}}, \quad (6)$$

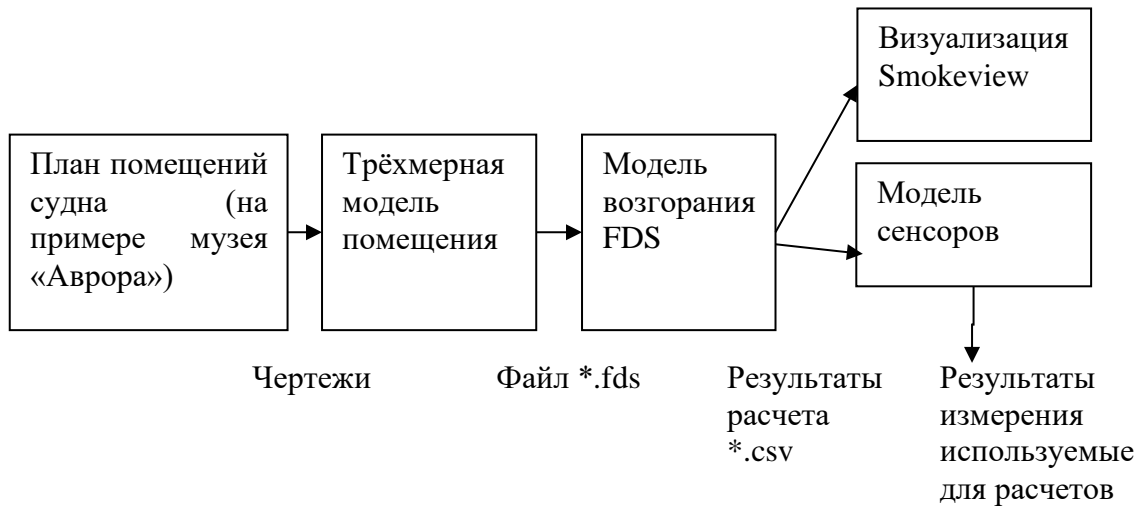
где  $\bar{W}$  – средняя молярная масса газовой смеси.

В приближении низкого числа Маха внешнее давление  $p(x, y, z)$  переходит в

$$p(x, t) = \bar{p}(z, t) + \bar{p}(x, t); \quad \bar{p}(z, t) = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{\bar{W}_{\alpha}}, \quad (7)$$

где  $\bar{p}(x, t)$  – давление, вызванное перемешиванием,  $\bar{W}_{\alpha}$  – молярная масса  $\alpha$  фракции газовой смеси.

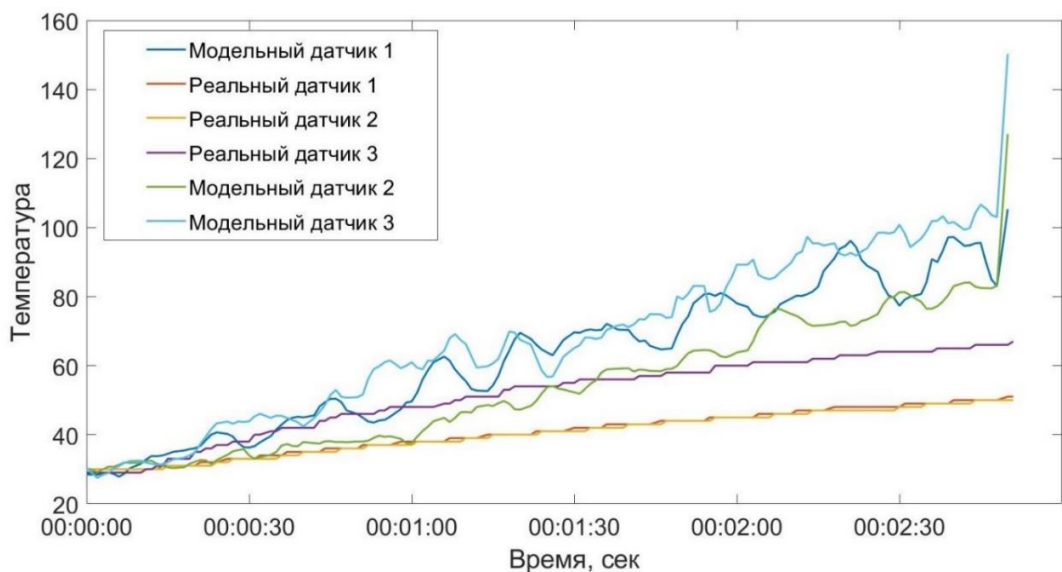
Основным недостатком полевой модели, рассчитываемой в FDS, является то, что модель FDS не моделирует реальные характеристики датчиков. Она выдает только рассчитанные в выбранной точке значения температуры, концентрации угарного газа и видимости без учета физических особенностей датчиков. Следовательно, модель должна быть включена в модель измерительной системы совместно с моделью, учитывающей инерционность датчиков. В общем виде процесс получения данных моделирования представлен на рис. 2.



*Рисунок 2 – Схема получения данных компьютерного моделирования*

Для решения поставленных задач были проведены серии модельных расчетов. Были построены модели с различным расположением равного по площади и интенсивности источника возгорания и модель с возгораниями различного типа. Эти модели использовались для расчета влияния расположения датчиков на время срабатывания противопожарной системы и для определения типа источника возгорания и его расположения.

Основным способом проверки адекватности модели является сравнение модельных данных с имеющимися данными натуральных экспериментов. Возьмем данные из эксперимента, проводимого в Шуйском филиале ООО "НПО Пожарная автоматика сервис". На рис. 4 представлен график изменения температуры для трех датчиков с реального эксперимента и трех датчиков, смоделированных на основе результата расчета в программе FDS с последующей обработкой их с помощью разработанной модели сенсоров.



*Рисунок 4 – Сравнение модельных и реальных данных*

Как видно из графиков, тенденции изменения температуры совпадают на начальном этапе, далее начинаются расхождения, вызванные в первую очередь тем, что в модели помещения пожар распространяется на другие предметы в помещении, а в натуральных испытаниях горит только источник возгорания. Натурные испытания не до конца повторяют ситуацию в помещении при пожаре, в отличии от модели, поэтому для построения алгоритмов модель помещения подходит лучше.

Необходимо оценить влияние случайной погрешности измерений на работу интеллектуальной противопожарной системы, основанной на нейросетевых алгоритмах. Для оценки будем прибавлять к исходному сигналу белый шум различной интенсивности. Зашумленность сигнала будем оценивать в процентах по следующей формуле:

$$SNR = \frac{P_{\text{сигнала}}}{P_{\text{шума}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $P_{\text{сигнала}}$  – мощность сигнала,  $P_{\text{шума}}$  – мощность шума.

Ошибку будем оценивать по следующей формуле:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $y_i$  – ожидаемый выход сети,  $\hat{y}_i$  – полученный выход сети,  $n$  – число подаваемых образцов.

Результаты оценивания приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Влияние зашумленности сигнала на выход сети*

Зашумленность сигнала, %	$E_r$ , %
99	0,0001
95	0,0009
90	0,0014
75	0,0016

Делаем вывод, что суперкомпьютерное моделирование возгораний позволяет без проведения дорогостоящих натуральных экспериментов выполнять исследование процессов возникновения и развития пожаров в промышленных помещениях. Сделаны выводы об адекватности применяемой модели и ее применимости для расчетов. Обоснована необходимость ориентироваться на данные модели, а не реальных экспериментов в связи с отсутствием динамики распространения пожара на другие предметы в них. Приведена оценка влияния случайной погрешности на результаты работы алгоритмов.

В третьей главе рассчитано оптимальное расположение многопараметрических датчиков в помещении на основе эволюционного

алгоритма. Чтобы повысить скорость реакции системы обнаружения пожара, необходимо расположить имеющиеся датчики так, чтобы время их реакции было минимальным. Факторы, влияющие на оптимальную расстановку датчиков: вероятность возникновения пожара в определенном месте помещения с координатами  $(x_1, x_2)$ ; тип источника возгорания и количество горючих материалов; размеры помещения и расположение вентиляции. При построении алгоритма необходимо учитывать эти факторы.

Были рассмотрены следующие оптимизационные методы: методы нулевого порядка (покоординатный спуск, метод поиска по симплексу), градиентные методы и эволюционные алгоритмы. Оценивалась применимость данных методов к задаче поиска оптимального расположения датчиков в помещении. В результате был выбран генетический алгоритм, который позволяет решить задачу многопараметрической оптимизации, и может быть использован в условиях, когда нет возможности дать точное математическое описание задачи, что полностью соответствует поставленной задаче.

Применить стандартный генетический алгоритм к поставленной задаче невозможно, так как все его операторы проводят действия над объектом, представленным в виде вектора значений, чаще всего бинарных. В рамках нашей задачи необходимо оперировать вектором объектов, каждый из которых должен учитываться отдельно при расчете фитнес-функции, что невозможно в классическом генетическом алгоритме. Опишем основные операторы генетического алгоритма, чтобы описать его применение к задаче поиска оптимального расположения.

Первым этапом является получение начальной популяции. Популяция – это набор из  $N$  расположений датчиков размера  $M$ , каждый из которых расположен на сетке  $10 \times 10$  см.

Второй этап – выбор фитнес-функции. Фитнес-функция или функция приспособленности – это функция, минимизацию которой мы будем осуществлять генетическим алгоритмом. Она должна отражать зависимость времени принятия решения о возгорании от значений факторов пожара, а именно температуры, концентрации угарного газа и видимости. Общий вид функции:  $F(\mathbf{x}) = \min_t [Fire(t, \mathbf{S})]$ , где  $t$  – время реакции, минимизацию которого необходимо произвести,  $\mathbf{S}$  – набор из  $M$  многопараметрических датчиков с их значениями,  $Fire(t, \mathbf{S}) = net(t, \mathbf{H}) = \phi(\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i)$ , где  $\phi$  – функция активации,  $N$  – число датчиков в помещении,  $\mathbf{W}$  – матрица весов. Каждый фактор пожара, подаваемый на вход сети, рассчитывается по формулам:

$$F_T = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J p_j(y_1, y_2) T_i(x_1, x_2, t); \quad (10)$$

$$F_{CO} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J p_j(y_1, y_2) CO_i(x_1, x_2, t); \quad (11)$$

$$F_{Sm} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J p_j(y_1, y_2) Sm_i(x_1, x_2, t); \quad (12)$$

где  $p_j(y_1, y_2)$  – распределение вероятностей возгорания в точке  $j$  с координатами  $(y_1, y_2)$ ,  $T_i(x_1, x_2, t)$  – значение температуры в точке  $i$  с координатами  $(x_1, x_2)$ ,  $CO_i(x_1, x_2, t)$  – значение концентрации окиси углерода в точке  $i$ ,  $Sm_i(x_1, x_2, t)$  – значение концентрации дыма в точке  $i$ .

Третий этап – применение оператора селекции. Отбор или селекция – это выбор из набора расположений датчиков таких, у которых фитнес-функция минимальная, количество таких наборов определяется в качестве входного параметра алгоритма.

Четвертым этапом является скрещивание. Скрещивание – это генерация новой популяции путем смешивания двух, выбранных на этапе отбора, расположений. Данный оператор был модифицирован для выбранной задачи, так как ни один из классических методов не удовлетворял условиям задачи.

Последний этап – мутация. Мутация – это изменение положения выбранных случайным образом из случайного набора расположений датчиков из полученной на этапе скрещивания популяции.

Модифицированный генетический алгоритм для поиска оптимального расположения датчиков представлен на рис 5.

Оценим результаты работы алгоритма. Среднее время срабатывания при использовании разработанного генетического алгоритма в зависимости от размера начальной популяции представлено на рис 6.

Как видно из графика, чем больше размер начальной популяции, тем меньше время обнаружения пожара. Однако увеличение начального размера популяции ведет к увеличению времени работы алгоритма расчета оптимального расположения.

Сравним время, которое требуется для определения возникновения возгорания датчиками, расположенными равномерно и датчиками, расположенными в рассчитанных генетическим алгоритмом местах.

При оптимальном расположении трех датчиков, показанном на рис.7, среднее время реакции уменьшилось на 72%.

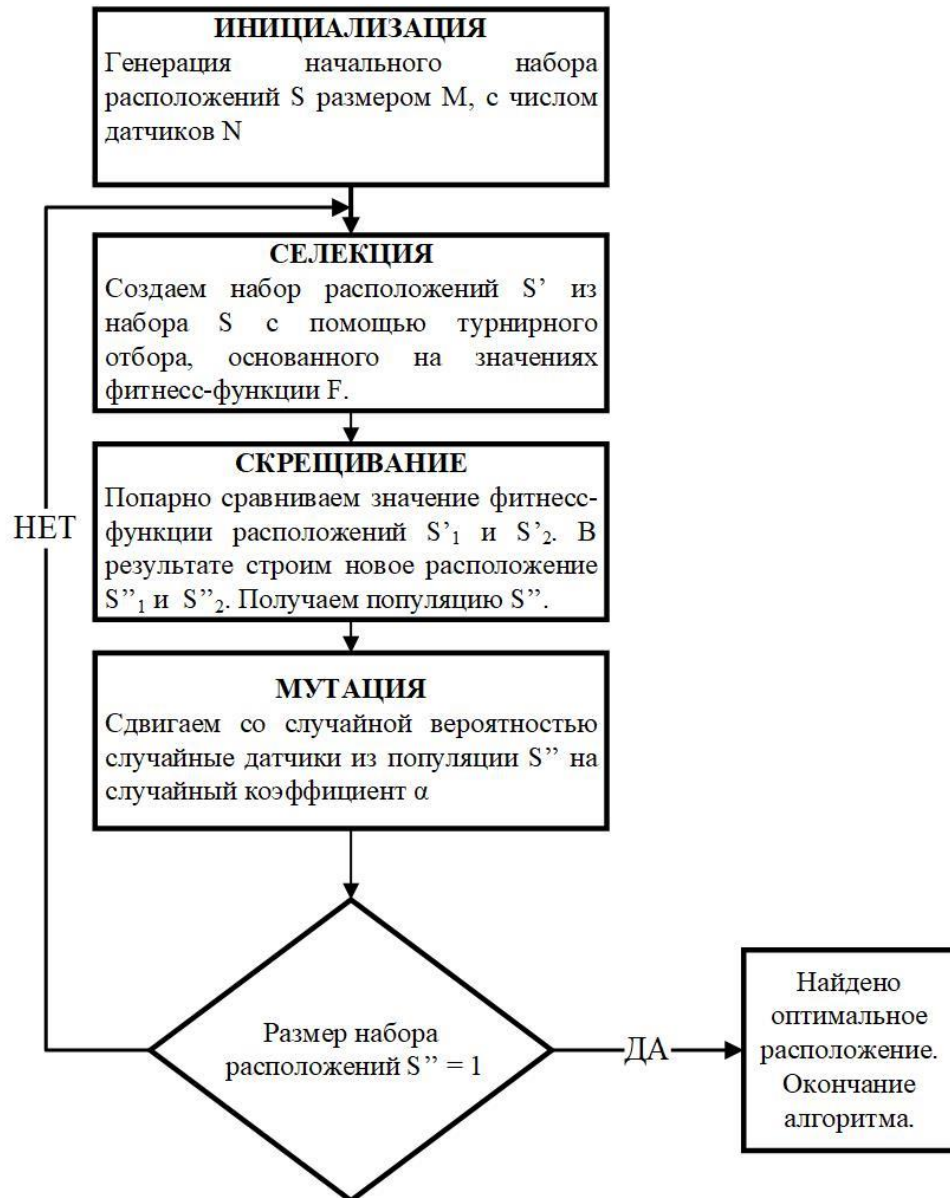


Рисунок 5 – Модифицированный генетический алгоритм

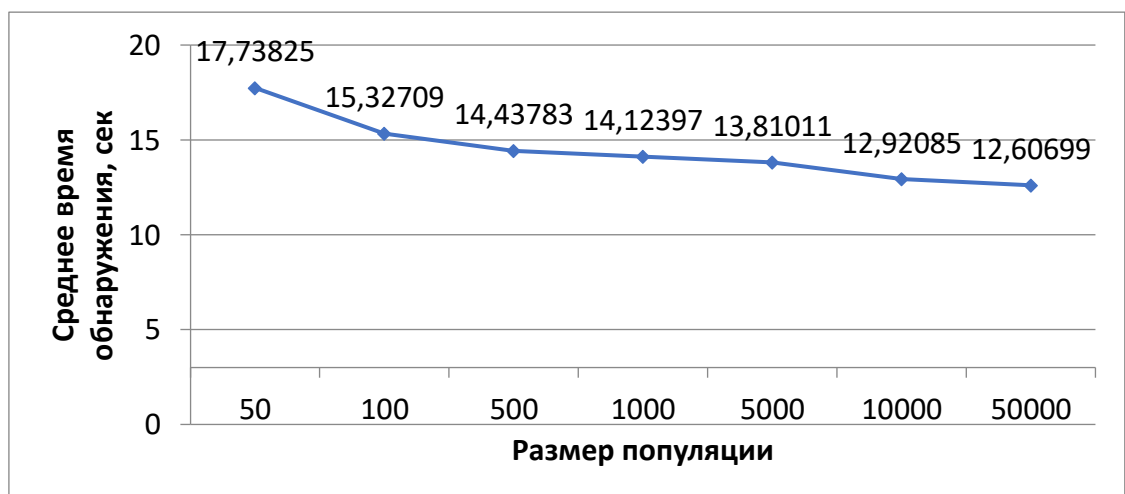


Рисунок 6 – Среднее время срабатывания в зависимости от размера начальной популяции



*Рисунок 7 – Расположение трех датчиков, рассчитанное генетическим алгоритмом*

Кроме того, оптимально расставленные датчики позволяют уменьшить общее число датчиков в помещении, что позволит сократить стоимость системы противопожарной защиты. Среднее время реакции равномерно расставленных трех датчиков и двух датчиков, расставленных оптимально 43,78 и 35,15 секунд соответственно. Из чего делаем вывод, что два датчика, оптимально расставленные в помещении дают результат лучше, чем три расставленные равномерно.

Таким образом для оптимального размещения сенсоров в помещении целесообразно использовать генетический алгоритм, который менее чувствителен к локальным оптимумам, чем традиционные алгоритмы. В результате использования генетического алгоритма для поиска оптимального расположения датчиков температуры удалось уменьшить среднее время обнаружения возгорания почти на 4 секунды. Было разработано приложение, позволяющее на имеющихся результатах моделирования рассчитывать место установки датчиков. Приложение позволяет выбирать необходимое количество датчиков и размер начальной популяции.

В четвертой главе построена интеллектуальная противопожарная система. Основные усовершенствования противопожарных систем можно производить в следующих аспектах: уменьшение числа соединительных кабелей путем использования беспроводных технологий; увеличение скорости реакции датчиков на возникновение возгорания за счет усовершенствования алгоритмов; определение типа источника возгорания для правильного подбора средств тушения; определение места возгорания для изоляции нужной зоны и включения автоматических средств тушения пожаров. Рассмотрим каждый аспект по отдельности.

**Принятие решения о возгорании.** Система с подвижными сенсорными блоками позволяет обнаружить возгорания разного типа, сопровождающиеся повышением температуры, задымлением и повышением концентрации характерных газов. Перемещаемые сенсоры позволяют контролировать труднодоступные места вероятных возгораний и быстро разворачивать противопожарную систему. Структура системы показана на рис.8

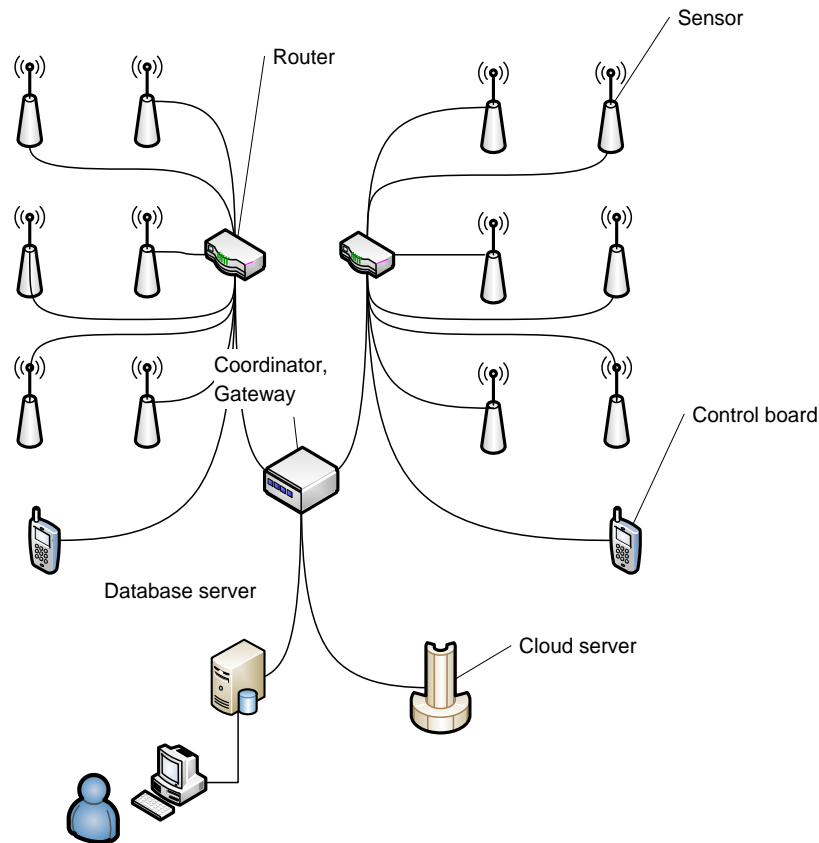


Рис. 8 – Структура системы раннего предупреждения о пожаре

Основной частью такой системы является модель принятия решения о возгорании, которая может находиться как на самом судне, так и на облачном сервере. Система, принимающая решение о пожаре, построена на основе искусственной нейронной сети с задержкой на входе. Основные характеристики построенной сети:

- Входной слой сети состроит из  $N$  значений, где  $N = k \cdot m \cdot 3$ ,  $k$  – число датчиков в помещении, три параметра измерения (температура, концентрация угарного газа и видимость),  $m = 3$  – задержка в три отсчета. Один скрытый слой, содержащий 7 нейронов и выходной слой. На выходе сеть выдает вероятность возникновения возгорания;
- Функция активации – сигмоида  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ ;
- Обучающая функция обратного распространения – метод Левенберга — Марквардта, использующий следующую аппроксимацию матрицы Гессе:  $x_{k+1} = x_k - [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}^T e$ , где  $\mathbf{J}$  – матрица Якоби.

Основное преимущество предложенной физической модели в том, что она является беспроводной, что позволяет устанавливать ее без прокладки кабелей и проводов. Возможность применения беспроводной технологии на судах, на примере платы ZigBee ETRX357 от компании TELEGESIS, была протестирована в реальных условиях. В случае помещения, не имеющего изолированных участков дальность устойчивой передачи данных, составила 17



метров. Если же присутствуют толстые перегородки и препятствия между устройствами для обеспечения устойчивого сигнала применяются маршрутизаторы.

Определение начала пожара с помощью нейронной сети по результатам проведенных расчётов показывает время реакции на начало возгорания быстрее, чем метод срабатывания по превышению приращения температуры на заданное значение. Также нейронная сеть не реагирует на распространенные случаи ложного срабатывания датчиков.

**Определение типа источника возгорания.** Для классификации по типу источника возгорания применим сиамские нейронные сети и байесовскую сеть.

Классическая архитектура сиамской нейронной сети имеет вид, показанный на рис 9.

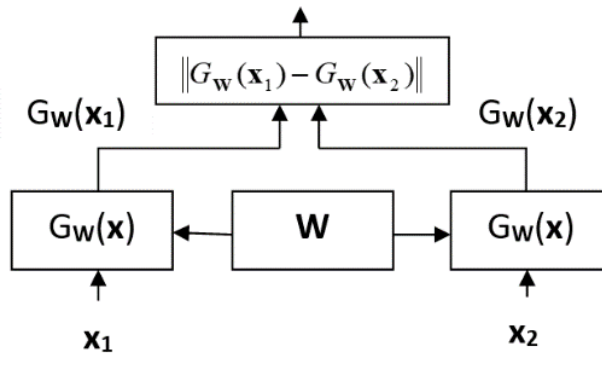


Рис. 9 – Структура классической сиамской сети.

Предположим, что  $G_W$  представляет отображение векторов признаков в пространство низкой размерности, выполняемое нейронной сетью с матрицей весов  $W$ . Для вычисления расстояния требуется использовать две нейронные сети с одинаковыми весами. Выходы двух нейронных сетей, имеющих одинаковые синаптические веса  $W$  для двух входных векторов, обозначим  $G_W(x_1)$  и  $G_W(x_2)$ , причем,  $x_1$  соответствуют отсутствию пожара конкретного типа и  $x_2$  – наличию возгорания.

Общая структура системы представлена на рис 10. Для наглядности изображения схемы представлена подача данных только одного параметра с первого датчика.

Результат обучения данной сети на модельных данных показал 93,7 процентов достоверности решений, следовательно, данная сеть может применяться для определения типа источника возгорания. Чтобы добавить новый тип источника возгорания, достаточно обучить сиамскую сеть распознавать только его и переобучить только сеть Байеса, которая обучается за 18 секунд. Это позволит очень быстро расширять систему при появлении нового возможного типа источника возгорания. Определение типа источника возгорания позволит

уменьшить ущерб от пожара применением рекомендованной для определенного источника возгорания системы тушения.

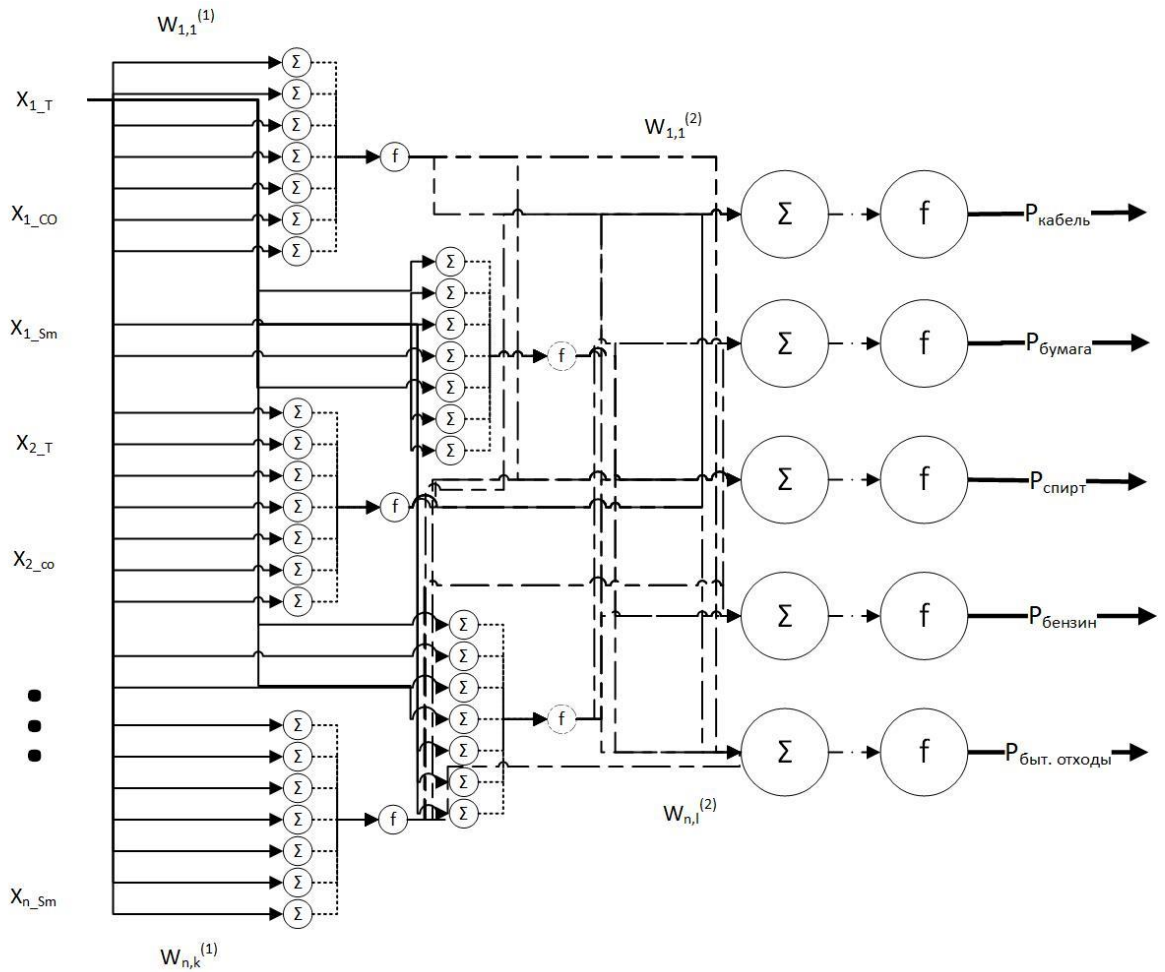


Рис. 10 – Структура системы определения типа источника возгорания

**Определение места возгорания.** Для помещений судов, оборудованных перегородками, делящими их на зоны, очень важно определить зону возгорания, чтобы изолировать ее и включить автоматизированные средства тушения пожара. Использование многопараметрических датчиков позволяет применить нейронную сеть к задаче поиска расположения источников возгорания. Для обучения сети применим два типа данных: данные, полученные в результате моделирования и данные, полученные в результате натуральных испытаний. Нейронная сеть, решающая эту задачу, имеет следующие характеристики:

- Входной слой сети состоит из  $N$  значений, где  $N = k \cdot m \cdot 3$ ,  $k$  – число датчиков в помещении, три параметра измерения (температура, концентрация угарного газа и видимость),  $m = 5$  – задержка в три отсчета. Два скрытых слоя, содержащих 8 и 5 нейронов соответственно и выходной слой. На выходе сеть выдает координату расположения источника возгорания;
- Функция активации – гиперболический тангенс  $f(x) = \tanh(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$ ;

- Обучающая функция обратного распространения – эластичная функция обратного распространения (Resilient back Propagation или RProp). Для определения величины коррекции используется следующее правило:

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \eta^- \cdot \Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{\partial E^t}{\partial \omega_{ij}} \cdot \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial \omega_{ij}} > 0 \\ \eta^+ \cdot \Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{\partial E^t}{\partial \omega_{ij}} \cdot \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial \omega_{ij}} < 0 \end{cases}, \text{ где } 0 < \eta^- < 1 < \eta^+.$$

Разработанный алгоритм определяет зону возгорания с достоверностью 89%.

Полученный алгоритм был протестирован в зависимости от расстановки датчиков в помещении. В результате было установлено, что применение генетического алгоритма при расстановке датчиков позволяет увеличить точность определения зоны возгорания на 17%.

Объединенная система противопожарной безопасности представлена на рисунке 11.

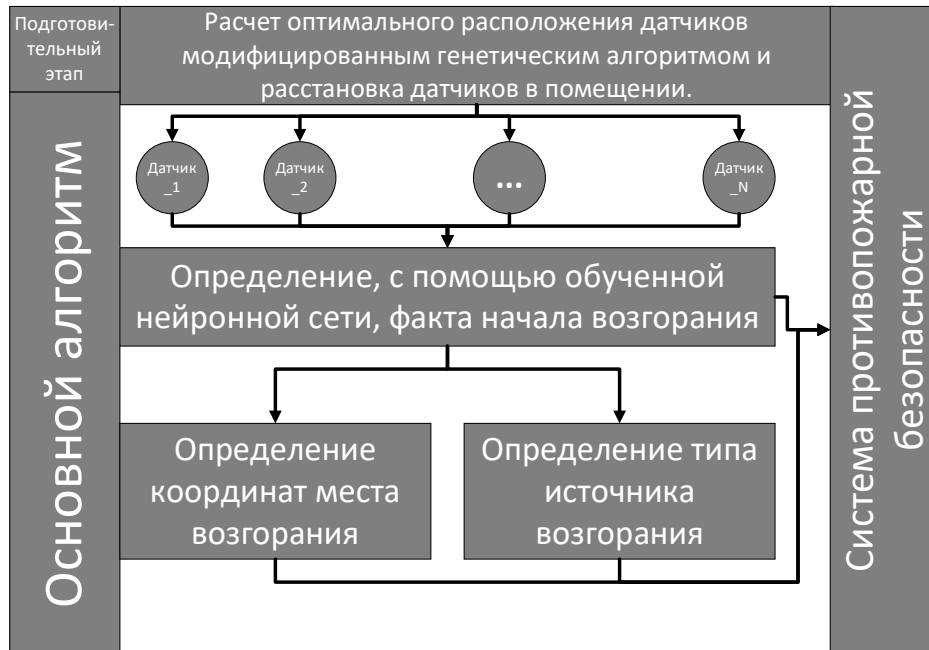


Рисунок 11 – Объединенная усовершенствованная противопожарная система

Таким образом, усовершенствованная противопожарная система позволяет: заменить проводные датчики беспроводными, уменьшить время срабатывания противопожарной системы, определить координаты и тип источника возгорания.

Новый многофакторный критерий обнаружения пожара на основе информации от множества сенсоров, позволяет повысить достоверность обнаружения и избежать ложных срабатываний. Использование улучшенной системы противопожарной безопасности позволит уменьшить негативные последствия пожара и повысить степень защищенности объекта.

## Заключение

1. Суперкомпьютерное моделирование возгораний позволяет без проведения дорогостоящих натуральных экспериментов выполнять исследование процессов возникновения и развития пожаров в промышленных помещениях. Созданы модели пожаров в различных помещениях, проведена корреляция модельных данных с данными натуральных экспериментов и сделаны выводы о их практическом применении для построения алгоритмов. Созданы модели датчиков с учетом их инерционности. Рассчитано влияние случайной погрешности на результат работы алгоритмов, основанных на искусственных нейронных сетях. Сделаны выводы об адекватности применяемой модели, а также ее применимости для расчетов. Обоснована необходимость ориентироваться на данные модели, а не на данные натуральных экспериментов в связи с отсутствием распространения пожара на другие предметы при их проведении.
2. Для оптимального размещения датчиков в помещении целесообразно использовать генетический алгоритм, который менее чувствителен к локальным оптимумам, чем традиционные алгоритмы. В результате использования генетического алгоритма для поиска оптимально расположения датчиков температуры удалось уменьшить среднее время обнаружения возгорания почти на 4 секунды. В качестве финального результата было разработано приложение, позволяющее на имеющихся результатах моделирования рассчитывать место установки датчиков. Приложение позволяет выбирать необходимое количество датчиков и размер начальной популяции.
3. Достигнуто улучшение следующих показателей противопожарной системы:
  - отказ от проводных технологий связи в пользу беспроводных;
  - использование построенного на основе искусственной нейронной сети алгоритма, позволяющего быстро и точно реагировать на возникновение возгорания;
  - использование построенного на основе сиамских сетей и сети Байеса алгоритма, определяющего тип источника возгорания;
  - алгоритм, рассчитывающий место возникновения пожара.

Новый многофакторный критерий обнаружения пожара на основе информации от множества датчиков, измеряющих значения опасных факторов пожара, позволяет повысить достоверность обнаружения и избежать ложных срабатываний.

### Работы, опубликованные автором по теме диссертации

В изданиях, индексируемых в Scopus:

1. Malykhina G.F., Guseva A.I., Milityn A. V. Early fire prevention in the plant //

- 2017 Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. IEEE, 2017. С. 1–4.
2. Malykhina, G.F., Guseva, A.I., Militsin, A.V., Nevelskii A.S. Developing an intelligent fire detection system on the ships // CEUR Workshop Proceedings / под ред. Sukhomlin V., Zubareva E. M.S.-S. Moscow: The II Convergent cognitive information technologies (Convergent'2017) international scientific conference, 2017. Т. 2064. С. 289–296.
  3. Guseva A.I., Malykhina G.F., Nevelskiy A.S. Neural Network Based Algorithm for the Measurements of Fire Factors Processing // Stud. Comput. Intell. 2019. Т. 799. С. 160–166.
  4. Guseva A., Malykhina G. Team of Neural Networks to Detect the Type of Ignition // Studies in Computational Intelligence. 2020. Т. 856. С. 392–397.
  5. Malykhina G., Guseva A. Application the Evolutional Modeling to the Problem of Searching the Optimal Sensors Location of Fire-Fighting System // Convergent Cognitive Information Technologies / под ред. Sukhomlin V., Zubareva E. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 187–199.
  6. Malykhina G., Guseva A. Application of Siamese Neural Networks for the Type of Emergency Determination // Proceedings of the XI International Scientific Conference Communicative Strategies of the Information Society. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019.

В изданиях индексируемых в Web of Science:

7. Malykhina G., Guseva A., Militsyn A. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction” (ISPCBC 2019). Paris, France: Atlantis Press, 2019.
8. Alena I. Guseva, Galina F. Malykhina, Vladimir N. Krugleevsky, Sergey N. Turusov I.V.O. Usign the neural network model of data processign in the fire detection systems for determination of the ignition location // Mar. Intellect. Technol. 2019. Т. 2, № 2. С. 93–102.

В изданиях, рекомендованных ВАК при МОиН РФ:

9. Гусева А.И., Малыхина Г.Ф., Круглеевский В.Н., Турусов С.Н. О.И.В. Использование нейросетевой модели обработки данных в системах обнаружения пожаров для определения места возгорания // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 93–102.
10. Малыхина Г.Ф., Гусева А.И. Использование компьютерного моделирования пожара для построения интеллектуальной противопожарной системы на судах // Приборы. 2020. Т. 4(238). С. 21–29.

В других рецензируемых изданиях:

11. Гусева А.И., Малыхина Г.Ф., Милицын А.В. Алгоритмы раннего предупреждения о возгорании в помещениях судна // Комплексная защита объектов информатизации. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 39–43.
12. Малыхина Г.Ф., Гусева А.И., Невельский А.С. Исследование характеристик пожара в помещениях судна с использованием моделирования на суперкомпьютере // Труды четвертой Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2017). Санкт-Петербург: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2017. С. 88–93.
13. Малыхина Г.Ф., Гусева А.И. Основанные на расстоянии нейронные сети в системах раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций // Коммуникативные стратегии информационного общества: труды XI Междунар. науч.-теор. конф., 25–26 октября 2019 г. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 187–189.
14. Гусева А.И. Модификации генетического алгоритма для расчета оптимального расположения датчиков // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2018; Санкт-Петербург) Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 19-24 ноября 2018 года. / под ред. Д. Дробинцев (и. о. директора института) Н.М.В. (ответственный редактор) [и др. ]. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 128–130.
15. Гусева А. И. Моделирование пожара в помещении на суперкомпьютере // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2018; Санкт-Петербург) Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 19-24 ноября 2018 года. / под ред. Д. Дробинцев (и. о. директора института) Н.М.В. (ответственный редактор) [и др. ]. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 130–133.
16. Гусева А. И. Верификация моделей пожара, созданных с помощью FDS // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2018; Санкт-Петербург) Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 19-24 ноября 2018 года. / под ред. Д. Дробинцев (и. о. директора института) Н.М.В. (ответственный редактор) [и др. ]. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 133–135.