На правах рукописи

Тачков Александр Анатольевич

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ ПОЖАРНОЙ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана и ООО НПФ «Спецсистемы»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Ющенко Аркадий Семенович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе МГТУ СТАНКИН, заведующий кафедрой робототехники и мехатроники Подураев Юрий Викторович

доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Арепин Юрий Иович, заместитель генерального директора по науке ЗАО НИИ «Центрпрограммсистем» (г. Тверь)

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (ФБГУ ВНИИПО МЧС России)

Защита состоится «28» мая 2013 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные г просьба высылать по адресу: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская, д.5, МГ Н.Э. Баумана, на имя ученого секретаря диссертационного совета

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Муратов И.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2029743
Тачков Д.А. Управление мо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Опыт ликвидации пожаров в помещениях (закрытых пожаров) показывает, что особая трудность принятия эффективных управленческих решений связана с тем, что пожар как информационный процесс одновременно сопровождается большим количеством изменяющейся информации. Информация носит зачастую субъективный, качественный и противоречивый характер. Достоверные и своевременно полученные данные добываются в ходе ведения разведки – одного из важнейших этапов борьбы с пожаром. Цель разведки заключается в локализации места возгорания и определения характеристик пожара: вида горючей нагрузки, площади и стадии пожара, необходимых руководителю тушения пожара (РТП) для принятия решения по организации ликвидации возгорания. Работы по разведке пожаров в помещениях всегда сопряжены с риском для жизни принимающего в них участие личного состава из-за экстремальности обстановки: сильного задымления помещений, воздействия повышенной температуры, концентрации продуктов горения и иных опасных факторов пожара (ОФП). Поэтому в России и за рубежом активно разрабатываются и начинают применяться мобильные робототехнические комплексы разведки и пожаротушения (МРК-РП), с помощью которых оператор может вести разведку локальных очагов возгораний, находясь вне опасной зоны. Существующие комплексы, как правило, управляются оператором в дистанционном режиме: при таком способе оператор непосредственно управляет всеми движениями робота с помощью задающих рукояток, основываясь на получаемом видеоизображении окружающей обстановки. Такое управление малоэффективно из-за дефицита времени в условиях оперативной обстановки, сложности воспринимаемой оператором информации и сильного задымления. В связи с этим для обеспечения комплексного функционирования МРК-РП актуально его дооснащение управляющей, информационной и коммуникационной подсистемами до пожарной разведывательной робототехнической системы (ПРРТС), способной к самостоятельным действиям в зоне пожара. Подобная система должна обеспечивать, с одной стороны, поддержку принятия решения оператора, а с другой – максимально полно извлекать и использовать информацию об окружающей среде.

Степень разработанности проблемы. Проблема извлечения и использования информации из окружающей среды в условиях пожара является ключевой из-за сложности физико-химических процессов горения и процессов тепломассообмена. Описанию особенностей указанных процессов большое внимание уделено в работах И.С. Молчадского, Ю.А. Кошмарова, А.В. Матюшина, С.В. Пузача, Ю.Д. Моторыгиина. Необходимо отметить вклад П.М. Евграфова, И. М. Тетерина, В.М. Климовцева, С.Г. Цариченко в разработку систем поддержки принятия решений РТП, в том числе при использовании робототехнических средств.

Одним из путей решения проблем управления ПРРТС в условиях неопределенности и обработки информации является применение методов

М Г Т У
им. Н Э. Баумана
Библиотека

искусственного интеллекта, получивших развитие при решении задач экстремальной робототехники в работах И.М. Макарова, В.М. Лохина, С.В. Манько, Е.И. Юревича, В.Г. Градецкого, В.Е. Павловского, Ю.В. Подураева, А.С. Ющенко, С.Л. Зенкевича. Тем не менее, в настоящее время отсутствует методика синтеза подсистемы управления ПРРТС, которая объединила бы как вопросы обработки информации об условиях пожара, так и вопросы управления ПРРТС с учетом особенностей окружающей среды.

Целью диссертационного исследования является получение научно обоснованных технических решений по структуре и управлению ПРРТС в условиях закрытого пожара на основе анализа его основных факторов, включая распределения температурных полей, концентраций O_2, CO_2, CO, и паров H_2O в разведываемых помещениях.

Научная новизна заключается в следующем:

1. предложена структура иерархической подсистемы управления ПРРТС, каждый уровень которой решает собственные подзадачи разведки пожара;
2. получено решение обратной задачи динамики пожара с сосредоточенными параметрами, которое позволяет определять характеристики и вид горящего вещества в помещении по оценкам наблюдений основных факторов пожара;
3. математически показана и экспериментально подтверждена применимость метода пропорционального наведения в скалярном температурном поле для автономного управления мобильной ПРРТС при поиске очага возгорания в группе смежных помещений;
4. разработан метод параметрической настройки функций принадлежности входных переменных контроллера тактического уровня подсистемы управления ПРРТС по заданному коэффициенту пропорционального наведения с использованием аппарата нечеткой логики.

Теоретическая значимость работы заключается в ее вкладе в развитие интегрального метода моделирования и исследования пожара, а также методов управления роботами, предназначенными для ведения его технической разведки.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. разработана методика ведения разведки закрытого пожара с использованием ПРРТС, позволяющая установить класс пожара;
2. определен состав бортового измерительного оборудования ПРРТС для оценки характеристик пожара, включающего датчики концентраций O_2,CO,CO_2, и паров H_2O;
3. разработаны алгоритмы управления ПРРТС при поиске очага возгорания на основе метода пропорционального наведения, а также алгоритм настройки параметров нечеткого регулятора;
4. разработано прикладное программное обеспечение для подсистемы обработки информации и управления ПРРТС.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы математического моделирования, теории автоматического управления, системного анализа, теории объектно-ориентированного анализа, теории наведения, математический аппарат нечетких множеств и нечеткой логики. Математическое моделирование проводилось в пакетах Matlab, PyroSim, МВТУ. При разработке программного обеспечения использовались среды C++ Builder, CLIPS и NI LabVIEW.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика ведения разведки закрытого пожара с применением ПРРТС на основе решения обратной задачи динамики пожара с сосредоточенными параметрами.
2. Способ и алгоритм управления автономной ПРРТС с использованием метода пропорционального наведения в скалярном поле температур.
3. Системотехнические решения, позволяющие обеспечить выполнение разведки закрытого пожара без непосредственного присутствия личного состава в зоне пожара.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается обоснованностью использования теоретических положений и методов, корректностью постановки и решения задач исследования, согласованностью теоретических выводов с данными вычислительных и натурных экспериментов.

Внедрение результатов. Материалы диссертации были использованы в НИР ГР № 012011620411 (шифр «Акула»), проводимой ООО НПФ «Спецсистемы» (г. Тверь) при разработке требований к системе управления передвижного мобильного транспортного средства для обнаружения очагов возгораний внутри помещений и методики синтеза двухуровневой системы управления данным средством. Техническое предложение по алгоритму разведки лесных пожаров с помощью группировки сверхмалых космических аппаратов, оснащенных перспективной разведывательной системой (интегрированной телевизионной и лидарной) в форме описания организации работ с применением метода решения обратной задачи динамики пожара были использованы в НИР ГР № 120156206 (шифр «2010-1.1-411-009-027»), проводимой ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (г. Санкт-Петербург). Результаты исследования внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на XXI, XXII XXIII международных научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (Москва, 2010 г.; Санкт-Петербург, 2010г.; Санкт-Петербург, 2011 г.), XII национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2010 (Тверь, 2010 г.), 5-ой научно-практической конференции «Безопасность большого города» (Санкт-Петербург, 2010 г.), VII международной научно-технической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 2011 г.), всероссийской научно-

технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2012 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 10 работах, в том числе в 3 журналах, входящих в перечень ВАК. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №11-01-00951-а).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 2 таблицы. Библиографический список содержит 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность работы, сформулирована основная цель и задачи, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены фазы протекания закрытого пожара в помещении. В качестве главных особенностей данного вида пожара, в которых РТП приходится организовывать разведывательные действия, выделены отсутствие информации о положении очага пожара, неизвестная заранее планировка помещений, отсутствие электронной карты объекта, высота потолков, не превышающая трех метров и сильное задымление, препятствующее визуальной разведке. Для проведения инструментальной разведки в зоне пожара без непосредственного присутствия человека предлагается применение ПРРТС. Аналитический обзор существующих подсистем управления ПРРТС в качестве их основных недостатков позволил выделить полуавтоматический метод дистанционного управления роботом, предполагающий управление со стороны оператора всеми движениями робота, и отсутствие инструментальных методов оценки основных характеристик пожара: вида горящих веществ, стадии пожара, скорости выгорания. В настоящее время также отсутствует целостная методика проведения автономной разведки с применением ПРРТС в условиях закрытых пожаров. Для ее разработки были определены следующие **задачи, отражающие логическую структуру диссертационной работы**:

1. Разработать методику установления класса пожара, его характеристик и места расположения очага возгорания с использованием ПРРТС.
2. Разработать структуру многоуровневой подсистемы управления ПРРТС, позволяющей реализовать методику ведения разведки.
3. Разработать экспертную систему, относящуюся к стратегическому уровню подсистемы управления, поддерживающую принятие решений оператора ПРРТС и РТП.
4. Разработать тактический уровень подсистемы управления, обеспечивающий автономное перемещение робота в условиях сильного задымления.
5. Разработать программно-аппаратный комплекс подсистемы управления ПРРТС и провести его экспериментальное исследование методом натурного моделирования.

Вторая глава посвящена разработке методики ведения разведки закрытого пожара с использованием ПРРТС. В результате анализа типовых пожарных нагрузок установлена возможность определения вида горящего вещества (классификация горючих веществ по ГОСТ 27331-87) по значениям стехиометрических коэффициентов (удельного потребления кислорода L_{O_2}, удельного выделения угарного L_{CO} и углекислого L_{CO_2} газов).

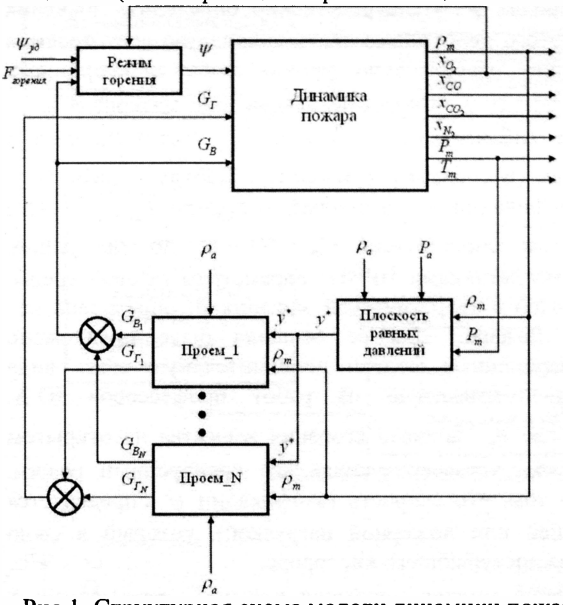

Рис.1. Структурная схема модели динамики пожара

Основная проблема распознавания класса пожара состоит в том, что эти коэффициенты (координаты вектора $\vec{L}=\{L_{O_2}, L_{CO}, L_{CO_2}\}$) в условиях разведки пожара не поддаются непосредственному измерению. Поэтому для их определения в работе предлагается использовать модель динамики пожара с сосредоточенными параметрами, представленную в виде структурной схемы на рис.1. Здесь x_{CO}, x_{CO_2}, x_{O_2}, x_{N_2} – среднеобъемная массовая концентрация (СМК) CO, CO_2, O_2 и N_2 соответственно; P_m – среднеобъемное давление в помещении; T_m – среднеобъемная температура; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды в помещении, ρ_a – плотность поступающих в помещение газов. Вектор стехиометрических коэффициентов $\vec{L}$ определяется из модели динамики пожара выражением (1):

$$\vec{L}=\frac{1}{\eta\psi}\cdot\begin{bmatrix}A & B & C\end{bmatrix}^T, \qquad (1)$$

где $A=G_B x_{O_{2B}}-G_I n_1 x_{O_2}-V\dfrac{d\left(\rho_m x_{O_2}\right)}{dt}$, $B=V\dfrac{d\left(\rho_m x_{CO}\right)}{dt}+G_I n_2 x_{CO}-G_B x_{CO_B}$,

$C=V\dfrac{d\left(\rho_m x_{CO_2}\right)}{dt}+G_I n_2 x_{CO_2}-G_B x_{CO_{2B}}$, V – свободный объем помещения, n_1, n_2 – неравномерность концентраций O_2 и продуктов горения, η – полнота сгорания, $x_{CO_B}, x_{CO_{2B}}, x_{O_{2B}}$ – СМК CO, CO_2 и O_2 в наружном воздухе.

Из рис.1 видно, что скорость изменения среднеобъемных показателей газовой среды в помещении определяется массовым расходом поступающего воздуха G_B, массовым расходом вытекающих наружу газов $G_Г$ и скоростью газификации горючего материала ψ. Непосредственно определить значения G_B и $G_Г$ невозможно: для этого необходимо знать количество всех проемов помещения, их расположение относительно уровня пола и координату плоскости равных давлений (ПРД) y^*. Скорость газификации материала ψ, в свою очередь, определяется количеством кислорода $x_{O_{2B}}$, поступающего в помещение вместе с воздухом (массовым расходом G_B), наряду с СМК O_2 – x_{O_2}, удельной скоростью газификации $\psi_{уд}$ и площадью пожара $F_{горения}$. Таким образом, задача состоит в определении G_B, $G_Г$, ψ по доступным непосредственному измерению датчиками ПРРТС параметрам газовой среды. Эта задача, используя аналогию с теоретической механикой, определена как обратная задача динамики пожара. Для ее решения было предложено накладывать на входные переменные модели дополнительную связь вида $\eta\psi L_{O_2} = \eta(\eta - \eta_0 K)/\left(x_{O_{2B}} G_B (1-K)\right)$, известную из работ профессоров Ю.А. Кошмарова и С.В. Пузача, где η_0 - полнота сгорания вещества на открытом воздухе, K – функция пожара, характеризующая его кислородный режим. Смысл этой связи состоит в том, что скорость газификации ψ определяется режимом пожара (вентиляцией или пожарной нагрузкой), который в свою очередь зависит от количества поступающего кислорода.

Тогда система уравнений модели динамики пожара разрешается в аналитической форме относительно неизвестного G_B, которое определяется как положительный корень квадратного уравнения (2). После чего из уравнений модели динамики пожара определяются переменные $G_Г$ и ψ:

$$\begin{cases} G_B^2\left(x_{O_2B} - \dfrac{x_{O_2} n_1 x_{N_{2B}}}{n_3 x_{N_2}}\right) - G_B \cdot V\left(\dfrac{x_{O_2} n_1}{x_{N_2} n_3} \cdot \dfrac{d\left(\rho_m x_{N_2}\right)}{dt} + \dfrac{d\left(\rho_m x_{O_2}\right)}{dt}\right) - \dfrac{\eta(\eta - \eta_0 K)}{x_{O_{2B}}(1-K)} = 0, \\ G_Г = \dfrac{1}{n_3 x_{N_2}} \cdot \left(x_{N_{2B}} G_B - V \dfrac{d\left(\rho_m x_{N_2}\right)}{dt}\right), \\ \psi = V\left(\dfrac{d\rho_m}{dt} - \dfrac{1}{n_3 x_{N_2}} \dfrac{d\left(\rho_m x_{N_2}\right)}{dt}\right) + \left(\dfrac{x_{N_{2B}}}{n_3 x_{N_2}} - 1\right) \cdot G_B, \end{cases} \qquad (2)$$

С учетом полученного решения схема алгоритма определения класса пожара может быть представлена в виде рис.2.

Решение обратной задачи (блок 3 на рис.2) подставляется в систему уравнений (1), и определяется вектор оценок признаков $\vec{L}$ (блок 4 на рис.2). Для определения вида горящего вещества по вектору $\vec{L}$ разработан нечеткий классификатор (блок 5 на рис.2), продукционные правила и функции принадлежности которого были определены по оценке распределения в

пространстве состояний признаков $\{L_{O_2}, L_{CO}, L_{CO_2}\}$ данных, взятых из базы типовых пожарных нагрузок.

Рис.2. Схема алгоритма определения класса пожара

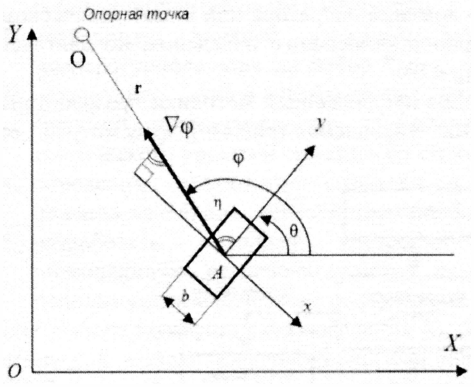

Рис.3. Наведение робота на очаг возгорания (опорную точку)

Для ведения инструментальной разведки ПРРТС должен располагаться в дверном проеме помещения пожара. Предварительно этот проём должен быть найден роботом самостоятельно. Задача поиска визуально ненаблюдаемого проема в диссертации была сведена к задаче самонаведения в осесимметричном поле ОФП, таких как температура, оптическая плотность и другие. Показано, что движение робота со скоростью υ вдоль направления градиента $(\varphi(\bar{r},t))$ опасного фактора пожара $T(r)$, и оснащенного средствами измерения этого фактора, разнесенными на расстояние b (рис.3), подчиняется методу пропорционального наведения $\omega = \dot{\theta} = K_H \cdot \dot{\varphi}$, где ω – угловая скорость робота, θ – его курсовой угол, $\dot{\varphi}$ – скорость изменения направления градиента ОФП, K_H – коэффициент наведения. С учетом трехмерной аппроксимации поля закон

навигации принимает вид $\omega = \dfrac{K_H \cdot \upsilon^2 \cdot \Delta T}{b\left(0{,}62\upsilon \cdot \left(T(r) - T_0\right) + H \cdot \dot{T}\right)}$, где ΔT – фиксируемая разность ОФП разнесенными на расстояние b измерительными средствами, T_0 – значение ОФП в координате начала движения ПРРТС, $\dot{T}$ – скорость изменения ОФП во времени, η – угол упреждения.

На основе полученных теоретических результатов автором разработана методика ведения разведки закрытого пожара с использованием ПРРТС, которая включает в себя следующие этапы.

1. Осуществить поиск проема помещения пожара, применяя метод пропорционального наведения.
2. Остановить ПРРТС в проеме помещения пожара, разместив тем самым в нем измерительное оборудование.
3. Измерить концентрации CO, CO_2, O_2, паров H_2O, перепад давлений в двух точках проема, высоту и объем помещения.
4. Вычислить СМК газов смеси и плотность газовой среды. Решить обратную задачу динамики пожара, произвести оценку координат вектора $\vec{L}$ и классифицировать горящее вещество с использованием нечеткого классификатора.
5. Передать полученную информацию оператору и РТП для принятия решения о последующих действиях.
6. Выйти в безопасную зону по команде оператора или в автоматическом режиме, используя метод пропорционального наведения, но двигаясь по антиградиенту (при этом $K_H < 0$).

В **третьей главе** для применения предложенной методики разработана структура многоуровневой подсистемы управления (рис.4), и рассмотрено ее взаимодействие с оператором.

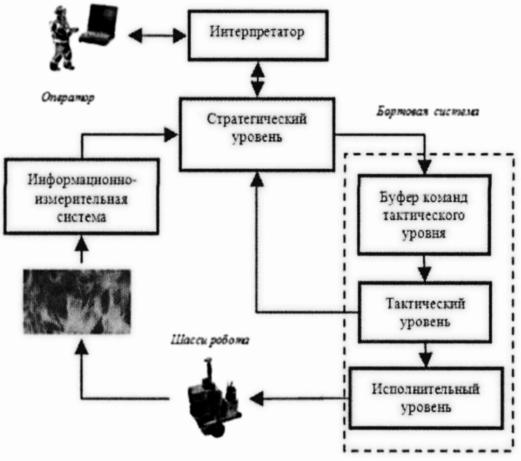

Рис.4. Структура подсистемы управления ПРРТС

Стратегический уровень управления построен на базе экспертной системы знаний о процессе протекания пожара, состояния робота и его навигационных возможностей. Экспертная система воспроизводит информационную модель разведки закрытого пожара, на основе которой оператор формирует образ реальной обстановки, производит анализ и оценку сложившейся ситуации. Эта модель содержит систему продукционных правил, разработанных на основе анализа процесса разведки пожара.

Тактический уровень при реализации заданной стратегическим уровнем цели, планирует траекторию движения робота, ориентируясь не только на количественные показатели ОФП, составляющие основу метода пропорционального наведения, но и на текущие дальности до препятствий. Ввиду того, что заранее невозможно предвидеть все возможные ситуации, нецелесообразно закладывать жесткий алгоритм управления ПРРТС на тактическом уровне. Поэтому в диссертации предложено строить данный уровень с использованием методов нечеткой логики, используя стереотипы поведения в виде продукционных правил: «если ситуация есть S_i, то тактика T_i». Задача синтеза структуры тактического уровня включает следующие стадии:

1. определить коэффициент наведения K_H, который при заданных динамических характеристиках исполнительного уровня и измерительной подсистемы обеспечивал бы устойчивое движение робота при поиске очага возгорания;
2. исследовать влияние величины модуля градиента скалярного температурного поля на выбор K_H;
3. осуществить выбор необходимых лингвистических переменных и функций принадлежности, обеспечивающих работу контроллера тактического уровня и его связь со стратегическим уровнем;
4. определить возможные ситуации и разработать продукционные правила, задающие стереотипы поведения ПРРТС;
5. разработать методику настройки функций принадлежности, позволяющую реализовать метод пропорционального наведения с использованием нечеткого контроллера.

Для выбора коэффициента наведения K_H разработана структурная схема математической модели цифровой системы наведения роботом в скалярном поле ОФП (температуры) с учетом динамических характеристик движения робота при повороте, системы управления исполнительного уровня и измерительной подсистемы (рис.5). Схема включат в себя сенсорную подсистему робота, оценивающую скорость изменения направления градиента температуры в процессе движения робота, контроллер, управляющий угловой скоростью робота в соответствии с методом пропорциональной навигации, модель температурного поля, а также кинематическую и динамическую модель движения робота.

В модели динамики поворота робота учтен основной возмущающий фактор – момент сопротивления повороту, зависящий от его радиуса. На исполнительном уровне подсистемы управления движением ПРРТС

использовался ПИ-закон регулирования для стабилизации заданной угловой скорости $\omega_з$. Основная задача синтеза системы наведения сведена к обоснованному выбору коэффициента пропорциональной навигации K_H в соответствии с условиями работы и возможностями робота.

При исследовании траекторий движения, полученных в непрерывной и цифровой моделях, установлено, что в непрерывной модели величина модуля градиента температуры не влияет на характер траектории движения при постоянном значении K_H.

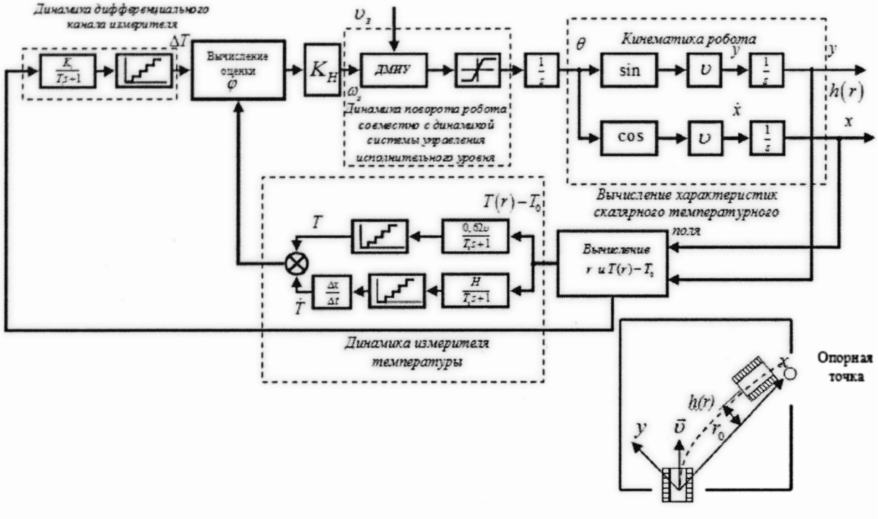

Рис.5. Структурная схема модели системы наведения

Исследование влияния квантования сигнала по уровню в цифровой системе управления на качество ее работы позволило установить, что для практической реализации системы наведения разрядность аналого-цифрового преобразователя в измерительной подсистеме должна составлять не менее 14 бит. Результаты моделирования показали, что при выборе K_H меньше десяти, минимальное расстояние до опорной точки, при котором осуществляется точное наведение, составляет 2-3 метра.

Установлено, что при движении робота к опорной точке происходит стабилизация его траектории вдоль определяемой начальными условиями прямой. В связи с этим при достижении опорной точки и преодолении проема требуется повторная инициализация значения измеренной начальной температуры T_0 для следующего помещения. Алгоритм работы системы управления, учитывающий эту особенность, в виде блок-схемы представлен на рис.6.

Управление движением ПРРТС в соответствии с разработанным алгоритмом осуществляется контроллером тактического уровня с применением методов нечеткой логики. В качестве лингвистических переменных были

выбраны следующие переменные: входные – «дальность до препятствий справа», «дальность до препятствий прямо», «дальность до препятствий слева», «окружающая температура», «скорость поворота градиента», «команда стратегического уровня по направлению движения», «команда стратегического уровня по скорости перемещения», выходные – «линейная скорость движения» и «угловая скорость поворота».

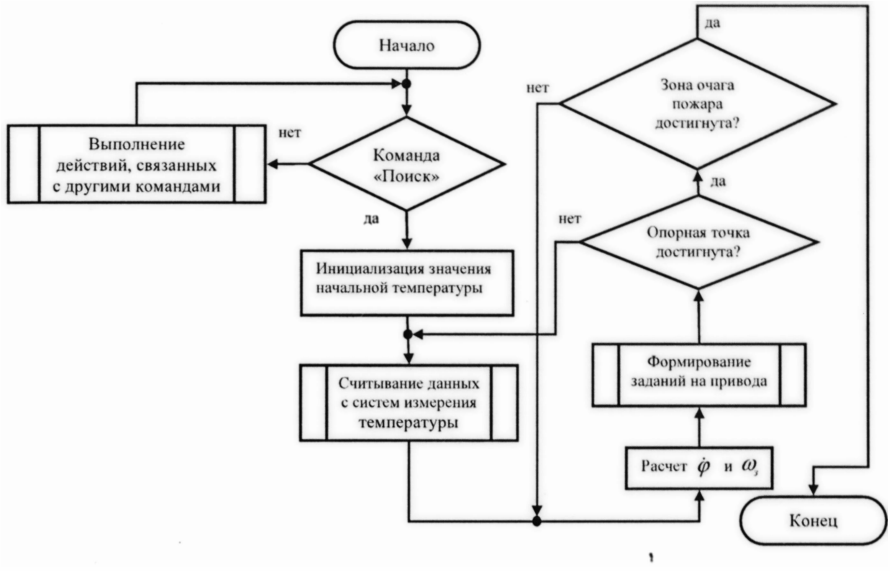

Рис.6. Блок-схема алгоритма работы тактического уровня подсистемы управления при поиске очага возгорания

База продукционных правил, задающих стереотипы поведения системы, включает правила, регламентирующие поведение робота при выполнении маневров по обходу препятствий, правила, реализующие пропорциональное наведение робота и правила, определяющие поведение робота по команде со стратегического уровня.

Настройка функций принадлежностей входных лингвистических переменных, за исключением переменной «скорость поворота градиента», проводилась экспертным путем с привлечением методов имитационного моделирования. Для аналитической настройки функций принадлежности входной переменной «скорость поворота градиента» разработан метод, использующий линейную зависимость выходной переменной – угловой скорости робота от входной: $\omega = K_H \cdot \dot{\varphi}$. Зная эту статическую зависимость, т.е. $y_C = f(x^*)$, и применяя при дефаззификации метод вычисления центра тяжести, получим искомые значения $\mu_i(x)$ (рис.7).

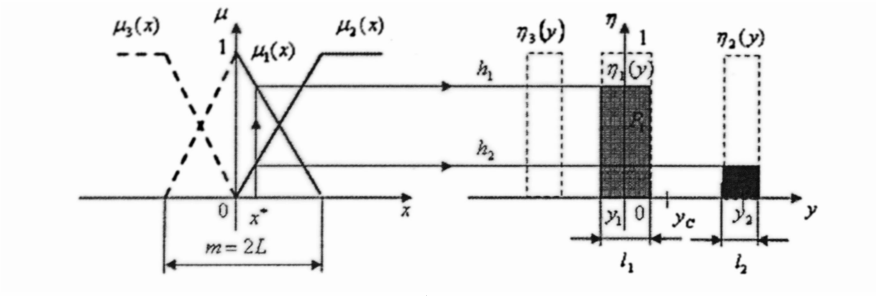

Рис.7. Настройка функций принадлежности

При вычислении значений $\mu_i(x)$ использовалось условие неразрывности единицы: $h_1+h_2=1$. В этом случае функции принадлежности входной переменной описываются формулой (3):

$$\mu_1(x)=\begin{cases}0, & h_1(y_C)<0\\ \dfrac{-f\cdot(y_C-y_2)}{(y_C-y_1)-f\cdot(y_C-y_2)}, & 0\le h_1(y_C)\le 1\\ 1, & h_1(y_C)>1\end{cases},\qquad (3)$$

$$\mu_2(x)=\begin{cases}0, & h_2(y_C)<0\\ \dfrac{y_C-y_1}{(y_C-y_1)-f\cdot(y_C-y_2)}, & 0\le h_2(y_C)\le 1\\ 1, & h_2(y_C)>1\end{cases}.$$

где $f=l_2/l_1$ - удельный вес функции принадлежности $\eta_1(y)$ и $\eta_2(y)$.

Прямоугольный вид функций принадлежности выходной переменной, как расширенный вариант синглтона, определяется аппаратными свойствами контроллеров, поддерживающих инструкции нечеткой логики. Таким образом, расчетный коэффициент K_{II} непосредственно участвует в методе параметрической настройки функций принадлежности контроллера входной лингвистической переменной, которая используется в реализации метода пропорционального наведения.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию подсистемы управления ПРРТС. Для этого был разработан и изготовлен макетный образец робота (рис.8), представляющий собой гусеничную платформу и выполненный в масштабе 1:6 по отношению к стоящему на вооружении МЧС РФ мобильному комплексу МРК-РП.

Отдельно по правому и левому бортам платформы были установлены элементы измерительной подсистемы наведения (термоэлектрические преобразователи К-типа), фиксирующие изменение температуры теплового потока очага возгорания, а в лабораторных условиях имитирующих датчики теплового потока. Исполнительный, тактический и стратегический уровни подсистемы управления ПРРТС были реализованы в виде программно-аппаратного комплекса, при этом стратегический и тактический уровни реализованы в виде программного обеспечения для персонального компьютера.

Рис.8. Натурный эксперимент по пропорциональному наведению на стендовом оборудовании

Программное обеспечение экспертной написано в инструментальной среде CLIPS. В отличие от известных решений по организации работы реализованных в CLIPS экспертных систем с пользовательским интерфейсом предложено использование в обработчике таймера специальной процедуры, добавляющей в план решения задачи факт, всегда активирующий логический вывод. За счет этого достигнута возможность циклического выполнения логического вывода. И, тем самым, осуществление постоянного контроля стратегического уровня за непрерывно меняющейся в процессе движения робота внешней ситуацией, а также поддержание диалога с оператором. Функции принадлежности переменной «скорость поворота градиента» в нечетком контроллере настраивались по формуле (3).

Эксперименты включали в себя два этапа: натурные испытания подсистемы управления (метод пропорционального наведения) и численные эксперименты по решению обратной задачи динамики пожара в различных стадиях закрытого пожара. Для проведения натурных экспериментов был изготовлен специальный стенд, имитирующий помещение, в качестве источника тепла применялся тепловентилятор (рис.8).

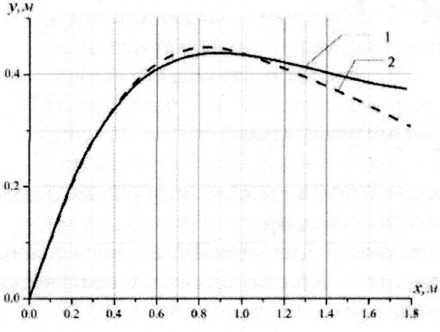

Рис.9. Экспериментальная (1) и расчетная (2) траектории движения ПРРТС

Сравнительные результаты реального движения робота в температурном поле с результатами компьютерного моделирования подтверждают адекватность предложенной модели системы наведения в скалярном температурном поле (рис.5). Расхождение между расчетными траекториями и траекториями, полученными в ходе натурных экспериментов, по абсолютной величине не превышает 7 сантиметров (рис.9), что с учетом собственных габаритов робота следует признать

удовлетворительным результатом.

В пакете моделирования динамики пожара PyroSim проведен численный эксперимент, воспроизводящий ситуацию по горению пролива этанола. По экспортированным из модели среднеобъемным данным была решена обратная задача динамики пожара (2) и рассчитаны оценки (1) стехиометрических коэффициентов горящего вещества (рис.10): $\tilde{L}_{CO} = 0{,}0011, \tilde{L}_{O_2} = 2{,}329$, $\tilde{L}_{CO_2} = 2{,}044$ (табличные значения $L_{CO} = 0{,}269, L_{O_2} = 2{,}362$, $L_{CO_2} = 1{,}937$; в табличном значении L_{CO} учтена концентрация водяных паров). Среднеквадратические отклонения найденных оценок при степени надежности 0,95 составили соответственно: $\sigma_{CO} = 1{,}56 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_{O_2} = 0{,}0126$, $\sigma_{CO_2} = 0{,}0126$. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что погрешности определения стехиометрических коэффициентов лежат в пределах погрешности модели динамики пожара (15-20%).

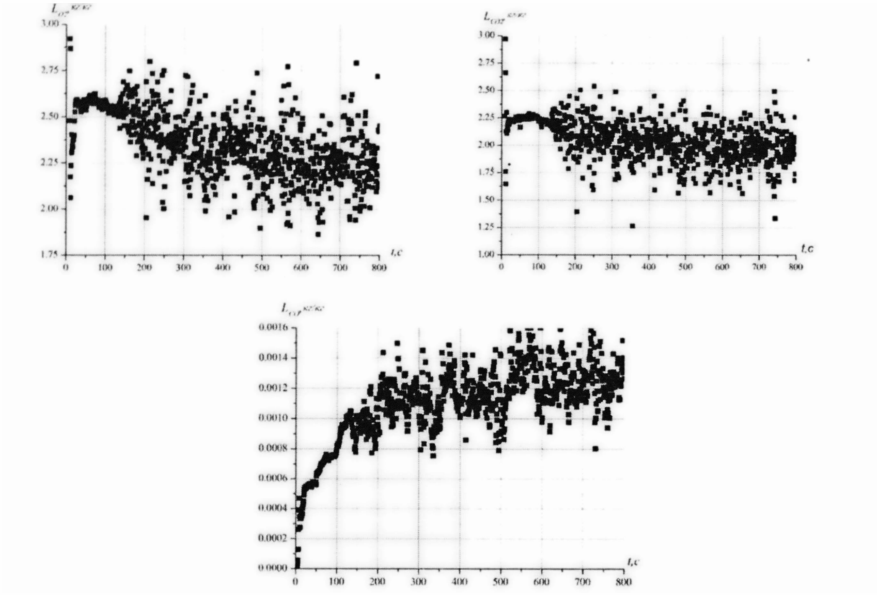

Рис.10. Оценки стехиометрических коэффициентов, полученные в ходе вычислительного эксперимента

Таким образом, результаты натурных испытаний и проведенные численные эксперименты подтвердили правильность теоретических положений, представленных в диссертации.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам диссертационного исследования и даны практические рекомендации по их применению в ФБГУ ВНИИПО МЧС России (г. Балашиха), ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург), ООО НПФ «Спецсистемы» (г. Тверь).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационном исследовании представлено решение актуальной научной задачи по управлению мобильной пожарной разведывательной робототехнической системой в условиях закрытого пожара.

1. Установлено, что класс пожара определяется значениями удельного потребления кислорода L_{O_2}, удельного выхода углекислого L_{CO_2} и угарного L_{CO} газов, которые характеризуют химическую реакцию горения вещества.
2. Решена обратная задача динамики пожара с сосредоточенными параметрами, математически показано, что решение существует для любой из стадий пожара, исключая момент его начала. Полученное решение позволяет проводить экспресс-анализ пожара.
3. Разработана методика разведки закрытого пожара, базирующаяся на предложенном решении обратной задачи динамики пожара с сосредоточенными параметрами. Определен состав необходимого бортового измерительного оборудования ПРРТС для решения этой задачи и оценки основных характеристик пожара (вида горящих веществ, стадии пожара, скорости выгорания).
4. Разработан способ распознавания класса пожара (вида пожарной нагрузки) с использованием системы нечеткого логического вывода, содержащей набор предложенных правил классификации по вектору стехиометрических коэффициентов, характеризующих химическую реакцию горения вещества.
5. Разработан метод определения стехиометрических коэффициентов путем решения обратной задачи динамики пожара,с сосредоточенными параметрами. Погрешность определения не превышает 15-20 %.
6. Предложена многоуровневая структура подсистемы управления, включающая стратегический, тактический и исполнительный уровни. На стратегическом уровне разработана экспертная система, поддерживающая принятие решений оператора, координирующая работу тактического уровня.
7. Предложен на тактическом уровне способ автономного наведения робота на визуально ненаблюдаемый очаг пожара с использованием метода пропорционального наведения в скалярном температурном поле. Для выбора коэффициента наведения K_H разработана математическая модель системы наведения ПРРТС в скалярном температурном поле с учетом динамики движения робота, характеристик измерительной подсистемы и модели температурного поля.
8. Разработаны макетный образец робота с системой наведения в температурном поле, программно-аппаратное обеспечение подсистемы управления ПРРТС и изготовлено стендовое оборудование для ее испытаний. Экспериментальное исследование подтвердило работоспособность предложенного способа управления роботом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ:

1. Тачков А.А. Применение метода пропорционального наведения для управления мобильным разведывательным роботом в условиях пожара // Мехатроника, автоматизация и управление. 2012. №7. С.27-33.
2. Тачков А.А., Ющенко А.С. Интерактивная система управления пожарным разведывательным роботом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Специальный выпуск №6. С.106-119.
3. Тачков А.А., Калиниченко С.В, Программное обеспечение для разработки моделей нечетких систем автоматического управления // Программные продукты и системы. 2009. №1. С.60-62.
4. Тачков А.А. Мобильный пожарный робот – разведка и определение класса пожара // Экстремальная робототехника: Труды международной конференции. СПб., 2010. С.129-136.
5. Тачков А.А. Нечеткая классификация пожара системой управления мобильного пожарного робота // Труды XII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010, Тверь, 20-24 сентября 2010 г. М., 2010. Т3. С.122-127.
6. Ющенко А.С., Тачков А.А. Управление пожарной робототехнической системой с использованием принципов диалогового управления // Экстремальная робототехника: Труды XXI международной научно-технической конференции. М., 2010. С.305-312.
7. Тачков А.А. Нечеткая система принятия решений пожарной робототехнической системой // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. науч. трудов VII-й международной научно-технической конференции, Коломна, 16-19 мая 2011 г. М., 2011. Т1. С.446-453.
8. Тачков А.А. Метод пропорционального наведения при поиске возгорания мобильным пожарным роботом // Экстремальная робототехника: Труды международной научно-технической конференции. СПб., 2011. С.194-200.
9. Система управления передвижного мобильного транспортного средства для обнаружения очагов возгорания внутри помещений: отчет о научно-исследовательской работе №2.2011 «Акула» / ООО НПФ «Спецсистемы»; Рук. Карнаухов Г.М.; исп. Тачков А.А. [и др.]. ГР № 01201162041. Инв. № 02201253697. Тверь, 2011. 62с.
10. Тачков А.А. Программно-аппаратная реализация экспериментального образца системы управления пожарным разведывательным роботом // Экстремальная робототехника: Сб. докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб., 2012. С.270-276.