



УДК 55.30.05

МРНТИ 78.25.43; 78.25.13

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_39_4_11

М.С. Ибраим¹, К.М. Мырзабеков², Ж.Ж. Оралбек^{3*}

^{1,2,3}Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
Алматы, Казахстан

*E-mail: zha.oralbek@aues.kz

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗМИНИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация. В статье проведен анализ мирового опыта разработки и внедрения роботизированных комплексов для разминирования, направленных на повышение безопасности и эффективности очистки территорий от мин и самодельных взрывных устройств. Рассмотрены современные технологии, используемые в автономных и дистанционно управляемых системах, включая сенсорные комплексы, навигационные системы, элементы искусственного интеллекта и интеграцию с беспилотными летательными аппаратами.

Методология исследования основана на сравнительном анализе существующих решений, изучении практики их применения в ведущих странах, таких как США, Россия, Китай и государства Европейского Союза, а также на оценке эффективности различных типов роботизированных комплексов, включая наземные платформы, мобильные роботы и беспилотные летательные аппараты.

В рамках практической части работы реализована математическая модель комбинированной сенсорной системы обнаружения, объединяющей индуктивные и ультразвуковые датчики, с целью повышения надёжности классификации объектов при разминировании. Разработка представлена в среде MATLAB Simulink и может служить основой для дальнейших исследований и внедрения интеллектуальных сенсорных модулей в состав отечественных роботизированных комплексов.

Также в статье рассмотрены перспективы локализации и адаптации передовых решений в Казахстане, включая разработку отечественных роботизированных платформ, возможность использования зарубежных технологий с учетом климатических и географических особенностей региона, а также необходимость совершенствования нормативно-правовой базы, развития инфраструктуры и подготовки специалистов для эффективного внедрения данных систем. Подчеркивается значимость дальнейших исследований в области автономных технологий, сенсорных систем и их интеграции в военную и гуманитарную сферы.

Ключевые слова: разминирование, мины, роботизированные комплексы, самодельные взрывные устройства, автономные системы.

Введение.

Мины и самодельные взрывные устройства (СВУ) представляют собой одну из наиболее серьезных угроз в зонах боевых действий и постконфликтных территориях. Эти средства поражения используются как традиционными вооруженными силами, так и

террористическими группировками, создавая серьезные препятствия для ведения военных операций, гуманитарных миссий и восстановления мирной жизни. По данным ООН [1], ежегодно тысячи людей становятся жертвами минных взрывов, включая военных, саперов и гражданских лиц, а разминирование территорий остается сложной и дорогостоящей задачей.

Традиционные методы разминирования включают использование саперных групп, обученных собак, специальных механических устройств и детекторов взрывчатых веществ. Однако эти методы имеют ряд значительных недостатков: высокую степень риска для саперов, ограниченную точность обнаружения мин, значительное время, необходимое для очистки больших территорий, а также сложность работы в неблагоприятных погодных условиях и сложном рельефе. Эти проблемы привели к необходимости разработки и внедрения роботизированных систем разминирования, которые способны выполнять сложные задачи с минимальным участием человека, снижая угрозу для личного состава и увеличивая скорость и эффективность операций [2].

Современные роботизированные комплексы для разминирования представляют собой автономные или дистанционно управляемые платформы, оснащенные различными сенсорами, средствами механического разминирования и программным обеспечением, обеспечивающим анализ данных и управление операциями. Они могут действовать как самостоятельно, так и в составе интегрированных систем, взаимодействующих с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), спутниковыми системами и наземными разведывательными комплексами [3]. Применение таких систем значительно повышает безопасность и снижает затраты на разминирование, особенно в сложных и опасных районах.

В последние десятилетия страны с развитым оборонно-промышленным комплексом активно разрабатывают и внедряют роботизированные системы для разминирования. США, Россия, Китай, страны Евросоюза и другие государства инвестируют значительные ресурсы в развитие подобных технологий [4]. Существуют как тяжелые гусеничные комплексы, предназначенные для механического уничтожения мин, так и мобильные роботы, способные дистанционно управляться саперами. В ряде случаев используются специализированные дроны, оснащенные оптико-электронными и магнитными сенсорами для поиска мин и других опасных объектов [5].

Казахстан, обладая значительными территориями, часть которых исторически подвергалась военным действиям, а также участвуя в международных миротворческих миссиях, нуждается в разработке и применении эффективных роботизированных решений для разминирования. Это требует активного развития отечественных технологий в данной области, что позволит создать передовые инженерные решения, адаптированные под специфические условия региона, повысить эффективность операций разминирования и укрепить научно-технический потенциал страны [6].

В данной статье рассматриваются основные мировые тенденции в разработке и применении роботизированных комплексов для разминирования, анализируются успешные примеры их внедрения в вооруженных силах различных стран и предлагаются возможные пути адаптации передового опыта для нужд вооруженных сил Казахстана. Акцент сделан на механических, дистанционно управляемых и автономных роботизированных системах, а также их интеграции с современными средствами навигации и связи.

Материалы и методы исследования.

Современные роботизированные комплексы для разминирования являются важным элементом инженерных войск и гуманитарных организаций, занимающихся разминированием опасных территорий. В последние десятилетия они значительно повысили безопасность и эффективность операций по обезвреживанию минных заграждений и самодельных взрывных устройств (СВУ) [7]. Эти системы делятся на

несколько категорий в зависимости от принципа работы и используемых технологий. В данной главе рассматриваются основные подходы к классификации роботизированных комплексов и ключевые технологии, применяемые в современных решениях.

Классификация систем по принципу работы.

Роботизированные комплексы для разминирования подразделяются на три основные категории в зависимости от их функциональности и принципа действия: наземные платформы с механическим разминированием, дистанционно управляемые и автономные роботы, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Наземные платформы с механическим разминированием представляют собой тяжелую технику, предназначенную для уничтожения минных заграждений механическим воздействием [8]. Они оснащены вращающимися фрезами, плугами и катками, которые физически разрушают мины, предотвращая их детонацию. Данные системы эффективны при зачистке больших территорий, однако имеют ограничения в сложных ландшафтах и требуют значительных затрат на техническое обслуживание.

Дистанционно управляемые и автономные роботы предназначены для точечного обнаружения и обезвреживания мин и СВУ [9]. Они оснащены манипуляторами, сенсорами и системами навигации, позволяющими им работать в опасных условиях без непосредственного участия человека. Управление может осуществляться оператором на расстоянии или системой искусственного интеллекта, анализирующей данные в реальном времени. Эти роботы обладают высокой точностью, но могут сталкиваться с проблемами автономности и ограниченного радиуса действия.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в разминировании позволяет проводить разведку минных полей с воздуха, что значительно снижает риск для саперов [10]. БПЛА оснащены инфракрасными, магнитными и оптико-электронными сенсорами, которые позволяют выявлять потенциальные угрозы без необходимости физического контакта. Их применение особенно актуально в зонах с затрудненным доступом, но основными ограничениями остаются ограниченный грузоподъемный потенциал и необходимость точной калибровки сенсоров.

Ключевые технологии, используемые в современных комплексах.

Развитие роботизированных комплексов во многом определяется технологическим прогрессом в области обнаружения, навигации и методов уничтожения взрывных устройств. Современные системы разминирования включают несколько ключевых технологических направлений.

Оптико-электронные системы обнаружения играют важную роль в обнаружении мин и СВУ [11]. Они включают камеры высокого разрешения, тепловизоры и лазерные сканеры, которые позволяют определять взрывные устройства по визуальным и тепловым признакам. Эти технологии улучшают точность обнаружения, но могут испытывать затруднения при работе в сложных погодных условиях или на пересеченной местности.

Магнитные и радиочастотные детекторы используются для выявления металлических элементов мин и скрытых взрывных устройств [12]. Данные системы эффективны при обнаружении традиционных мин, содержащих металлические компоненты, но могут испытывать трудности при работе с неметаллическими СВУ. Радиочастотные детекторы позволяют выявлять электронные компоненты минных взрывателей, что делает их ценным инструментом при обнаружении современных самодельных устройств.

Гидропневматические и взрывные методы уничтожения включают механизмы разрушения мин и СВУ без необходимости их непосредственного обезвреживания [13]. Гидропневматические системы создают мощную струю жидкости под высоким давлением, способную разрушать детонаторы взрывных устройств. Взрывные методы предполагают использование накладных зарядов, которые вызывают детонацию мин на безопасном расстоянии. Эти методы отличаются высокой эффективностью, но требуют точных расчетов и соблюдения мер предосторожности.

Современные системы разминирования постоянно совершенствуются, интегрируя новые технологии обнаружения и уничтожения взрывных устройств [14]. Автоматизация процессов, развитие систем искусственного интеллекта и повышение автономности платформ позволяют значительно повысить эффективность операций по разминированию, снижая риск для саперов и минимизируя время проведения работ. Несмотря на существующие ограничения, дальнейшие исследования и разработки в этой области приведут к созданию еще более надежных и адаптивных систем, способных работать в самых сложных условиях.

Анализ опыта применения роботизированных комплексов в разных странах.

Современные технологии роботизированного разминирования активно применяются в различных странах, где проблема минной угрозы остается актуальной. Эти технологии способствуют повышению эффективности и безопасности операций по очистке территорий от мин и самодельных взрывных устройств (СВУ). В данном разделе анализируются программы разминирования, реализуемые ведущими государствами, а также роль международных гуманитарных организаций в разминировании [15].

Программы разминирования с применением роботов США.



Рисунок 1 – Применение мобильного робота TALON в разминировании

США являются мировым лидером в разработке и применении роботизированных комплексов для разминирования. Американские военные активно используют системы, такие как TALON на рисунке 1 и PackBot, в зонах боевых действий и в гуманитарных миссиях [16]. TALON, разработанный компанией Foster-Miller, представляет собой многофункционального робота, оснащенного видеокамерами, датчиками и манипулятором для работы с подозрительными объектами. Он доказал свою эффективность в Ираке и Афганистане, где использовался для разведки местности и обнаружения СВУ. Однако его зависимость от оператора и ограниченная автономность остаются проблемами при его применении.

PackBot, созданный компанией iRobot, отличается высокой мобильностью и возможностью проникновения в труднодоступные зоны [17]. Он активно использовался американскими военными в городских условиях, где позволял оперативно выявлять мины и другие угрозы. Однако одним из недостатков PackBot является его относительно небольшое время работы от аккумулятора, что ограничивает длительность операций.

Европейские разработки.

Европейские страны активно развивают собственные технологии разминирования в рамках международного сотрудничества. Одним из наиболее значимых проектов является TMRP (Tactical Mobile Robotic Platform), направленный на создание мобильных

роботизированных систем для обнаружения и уничтожения мин [18]. Эти платформы оснащены датчиками, работающими на основе машинного обучения, что позволяет им адаптироваться к различным условиям местности.

Другим важным направлением является проект iMUGS, который представляет собой модульную платформу с возможностью интеграции различных систем, включая БПЛА и автономные наземные роботы [19]. Разработка направлена на создание единой системы взаимодействия между различными роботизированными комплексами, что значительно повышает координацию действий на минных полях.

Применение роботизированных комплексов «Уран-6», «Платформа-М».



Рисунок 2 – Пример механического разминирования роботизированным комплексом «Уран-6»

Россия активно разрабатывает и внедряет роботизированные комплексы для разминирования как в военных, так и в гуманитарных операциях. Одним из наиболее известных решений является «Уран-6» – дистанционно управляемый гусеничный робот, предназначенный для механического разминирования [20], показан на рисунке 2. Он активно использовался в Сирии для очистки освобожденных территорий. Основным преимуществом «Уран-6» является его способность работать в сложных условиях, однако его масса и габариты ограничивают мобильность в труднопроходимых зонах.

Еще одним перспективным направлением является «Платформа-М», роботизированная система, способная выполнять задачи по обнаружению и уничтожению мин. Этот комплекс разрабатывается с возможностью интеграции с различными видами вооружений, что делает его универсальным средством для инженерных войск. Однако сложность управления и высокие требования к подготовке операторов остаются вызовами при его внедрении.

Новые тенденции в разработке автономных систем разминирования Китая.

Китай инвестирует значительные ресурсы в разработку автономных систем разминирования, ориентируясь на интеграцию искусственного интеллекта и машинного зрения. Разработки ведутся в области автономных наземных комплексов, таких как HJ-300, который оснащен системой автоматического обнаружения мин. Данный робот использует комбинацию магнитных и инфракрасных сенсоров для определения местоположения взрывных устройств.

Другим значимым проектом является XJ-01, платформа, сочетающая возможности наземных и воздушных сенсоров. Этот комплекс оснащен беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), которые осуществляют аэроразведку минных полей и передают данные на наземные модули. Такой подход позволяет значительно повысить точность картографирования минных полей и ускорить процесс разминирования. Однако высокая

стоимость и сложность обслуживания остаются ключевыми вызовами для массового внедрения данной технологии.

Международные гуманитарные миссии.

После завершения вооруженных столкновении ООН, ОДКБ и НАТО играют ключевую роль в разминировании территорий, пострадавших от военных конфликтов. Организации внедряют современные технологии и финансируют программы по разминированию в зонах повышенной опасности. В частности, HALO Trust, некоммерческая организация, использует роботизированные комплексы для гуманитарного разминирования в Африке и на Ближнем Востоке. А также исследовательский центр GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining) разрабатывает стандарты и методологии для внедрения роботизированных решений в данной области. Эти системы позволяют значительно ускорить процесс очистки территорий от взрывоопасных объектов.

Результаты и их обсуждение.

Применение датчиков обнаружения в роботизированных системах разминирования.

В современных роботизированных системах, предназначенных для задач разминирования, особую роль играют датчики обнаружения. Именно они обеспечивают возможность выявления потенциально опасных объектов — таких как мины, снаряды или самодельные взрывные устройства — на расстоянии и без физического контакта. Это позволяет значительно снизить риски для операторов и увеличить эффективность обследования сложных участков местности.

Определение типов датчиков обнаружения.

На данный момент существует множество типов датчиков, но на практике чаще всего применяются три основных вида: индуктивные, оптические и ультразвуковые. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и ограничения, поэтому выбор подходящего типа датчика зависит от условий эксплуатации и характера целей.

- Индуктивные датчики работают на основе электромагнитного поля и реагируют исключительно на металлические объекты. Они незаменимы при поиске противопехотных мин или металлических осколков вблизи поверхности. Например, в мобильных платформах часто используются промышленные модели вроде Bosch IMB12, способные точно фиксировать небольшие металлические фрагменты в грунте.

- Оптические датчики функционируют по принципу отражения света: излучают инфракрасный или лазерный луч и измеряют интенсивность отражённого сигнала. Такие устройства чувствительны и позволяют обнаруживать даже неметаллические предметы. Однако их точность может снижаться в условиях пыли, тумана или яркого света. В качестве примера можно привести популярный инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21YK0F, который используется в лёгких роботах-разведчиках.

- Ультразвуковые датчики измеряют расстояние до объекта на основе времени пролёта звуковой волны. Они менее чувствительны к освещённости и хорошо подходят для работы в помещениях или при слабой видимости. Одним из наиболее доступных и часто используемых решений является модуль HC-SR04, позволяющий сканировать объекты на расстояниях до нескольких метров.

На практике каждый тип датчика имеет определённую "зону уверенного обнаружения", которая зависит от материала цели, условий среды и угла установки. Поэтому в современных роботизированных системах часто применяется комбинация нескольких датчиков. Они объединяются в мультисенсорные модули с алгоритмами фильтрации и слияния данных.

Принцип работы индуктивного датчика обнаружения показан на рисунке 3.

Индуктивные датчики являются одними из наиболее надёжных средств обнаружения металлических объектов. Принцип их действия основан на создании переменного электромагнитного поля с помощью катушки. Когда в зону действия такого поля попадает металлический предмет, в нём индуцируются вихревые токи, которые создают собственное

поле, взаимодействующее с полем катушки. Это приводит к изменению амплитуды или частоты колебаний, что и фиксируется как признак присутствия объекта. Принцип вычисления выходного сигнала можно описать формулой:

$$U_{\text{выход}} = A * k \quad (1)$$

Где: $U_{\text{выход}}$ – выходной сигнал; A – амплитуда переменного тока, генерируемого катушкой; k – коэффициент затухания сигнала, уменьшающийся при появлении металла вблизи.

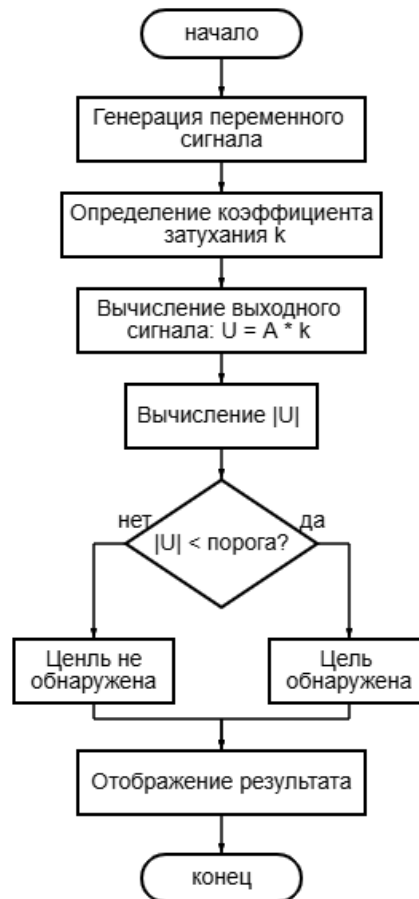


Рисунок 3 - Алгоритм работы индуктивного датчика

Принцип работы оптического датчика обнаружения показан на рисунке 4.

Оптические датчики используются для определения наличия объектов за счёт анализа отражённого света. Принцип их работы основан на том, что излучаемый инфракрасный или лазерный луч отражается от поверхности объекта и возвращается к приёмнику. По интенсивности отражённого сигнала можно судить о наличии и расстоянии до цели.

Наиболее часто оптические сенсоры применяются в робототехнике для обнаружения препятствий, позиционирования, а также в задачах разминирования — при визуальном сканировании поверхности.

Математическую модель сигнала можно описать как интенсивность отражённого сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$S(d) = \frac{A}{d^2} \quad (2)$$

где: $S(d)$ – сила отражённого сигнала; A – мощность исходного сигнала; d – расстояние до объекта.

При уменьшении расстояния сила отражённого сигнала возрастает, что позволяет надёжно фиксировать присутствие объекта в пределах определённого диапазона.

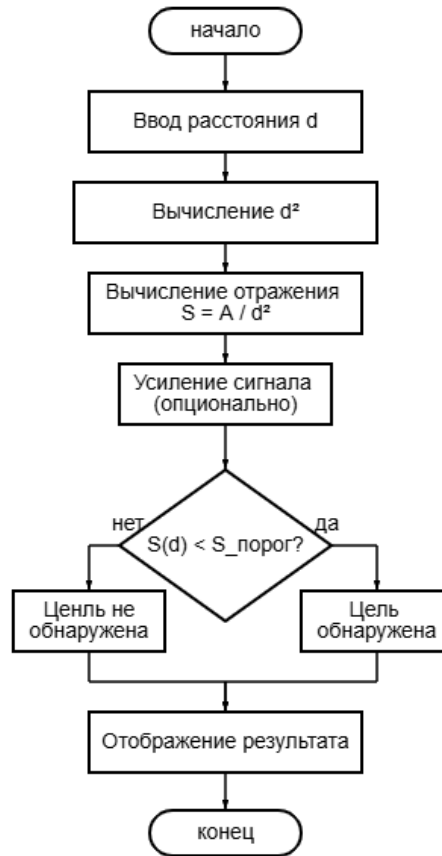


Рисунок 4 – Алгоритм работы оптического датчика

Принцип работы ультразвукового датчика обнаружения.

Ультразвуковые датчики используются для определения расстояния до объектов на основе анализа времени распространения звуковой волны. Датчик испускает акустический импульс в диапазоне 20–40 кГц и измеряет время, через которое отражённый сигнал возвращается к приёмнику. Это время прямо пропорционально расстоянию до объекта.

Такие датчики широко применяются в системах разминирования, особенно в условиях слабой освещённости, запылённости или полного отсутствия визуального контакта с целью. Расстояние до объекта определяется по времени пролёта звука туда и обратно:

$$t = \frac{2*d}{v} \quad (3)$$

Где: v – скорость звука в воздухе, обычно $v = 343\text{м/с}$ при температуре 20°C

Из рисунка 7 видно, что пороговое значение времени используется для принятия решения о наличии цели.

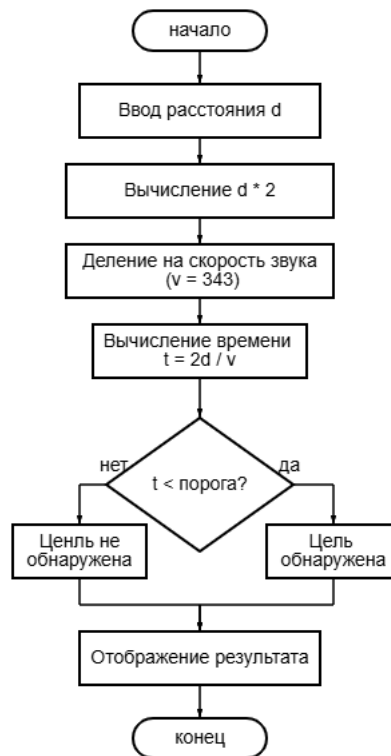


Рисунок 5 – Алгоритм работы ультразвукового датчика

Математического моделирования датчиков обнаружения.

Для анализа характеристик различных типов датчиков обнаружения была построена визуальная модель в среде MATLAB Simulink. В этой модели воспроизведены три датчика — индуктивный, оптический и ультразвуковой — в условиях, приближённых к идентичным по параметрам эксплуатации: расположение объектов, их свойства и расчёт времени отклика проводились по одинаковым принципам.

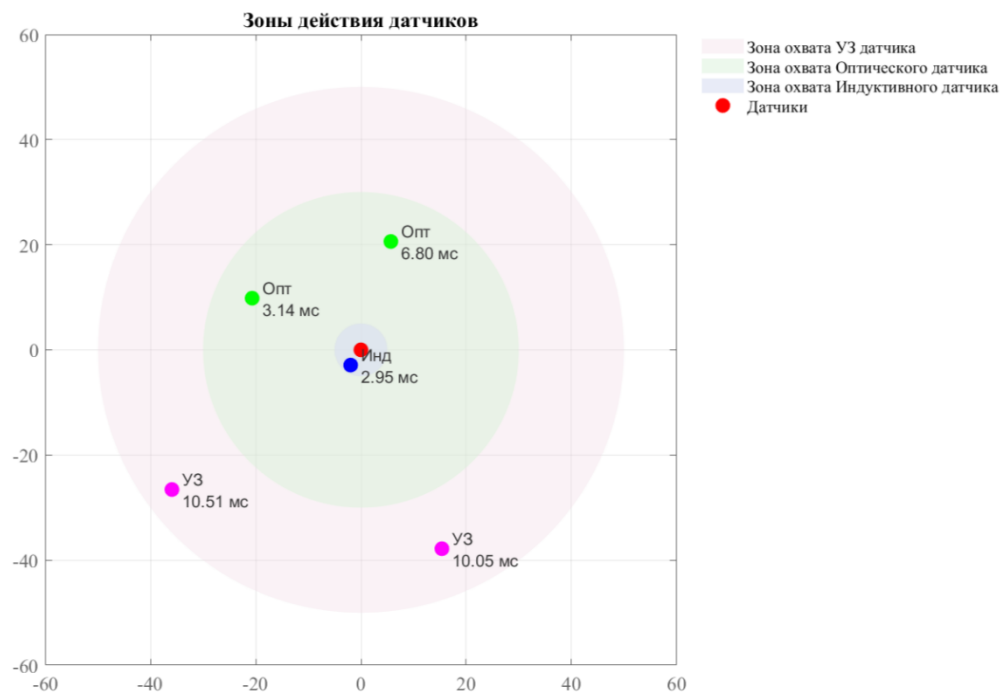


Рисунок 6 – Диаграмма моделирования зоны действия датчиков

На рисунке 6 представлена диаграмма, где каждая окружность обозначает зону уверенного обнаружения соответствующего датчика. Внутри этих зон размещены целевые объекты, а рядом указано рассчитанное время отклика (в миллисекундах), за которое конкретный тип датчика фиксирует присутствие цели.

В ходе моделирования были получены следующие наблюдения:

- Индуктивный датчик обладает самой высокой точностью на малых расстояниях и минимальным временем реакции, но его способность к обнаружению ограничена объектами, содержащими металл.

- Оптический датчик обеспечивает хорошую чувствительность на средней дистанции и может обнаруживать неметаллические цели, однако его точность снижается при изменении условий освещения и наличии пыли.

- Ультразвуковой датчик показывает наибольшую зону покрытия, но с большей задержкой, и подвержен искажению сигнала при наличии мягких или звукопоглощающих материалов.

Анализ полученных результатов показывает, что каждый тип датчика обладает своими структурными преимуществами и ограничениями, и оптимальное решение для задач обнаружения является комбинирование работа датчиков.

Комбинированная система обнаружения.

Для повышения надёжности и точности обнаружения целей в условиях, где одна технология может оказаться недостаточной, в роботизированных системах разминирования нередко применяются комбинированные сенсорные решения. В данной работе была реализована система, объединяющая индуктивный и ультразвуковой датчики, каждый из которых отвечает за свой диапазон расстояний и тип цели.

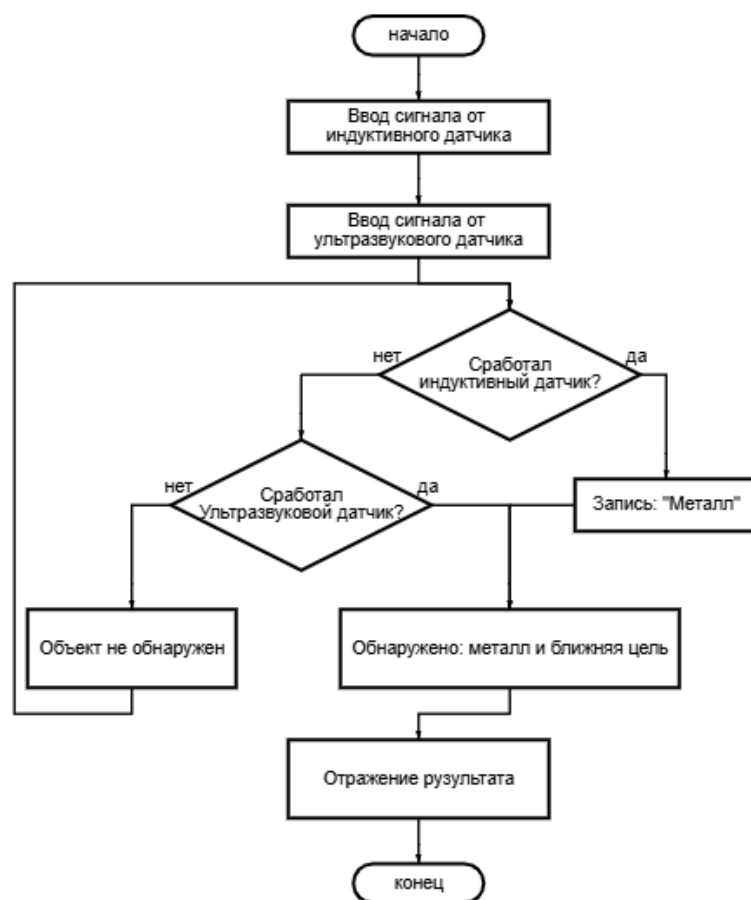


Рисунок 7 – Алгоритм работы комбинированной системы обнаружения

Индуктивный датчик на рисунке 7 особенно хорошо реагирует на металлические объекты, расположенные вблизи — его зона уверенного обнаружения ограничивается, как правило, несколькими сантиметрами. В то же время ультразвуковой датчик способен определять объекты на более больших расстояниях, независимо от их материала. Благодаря такой комбинации система получает возможность реагировать как на ближние металлические цели, так и на неметаллические объекты на большей дистанции.

Алгоритм функционирует следующим образом:

1) Система получает значения расстояния от индуктивного и ультразвукового датчиков.

2) При срабатывании индуктивного датчика (при $d < 5$) происходит моментальная фиксация металлической цели.

3) Если индуктивный датчик не сработал, но ультразвуковой сигнал прошёл в пределах допустимого временного окна ($d \leq 0.2$ м, или $t \leq 2d / v$ при $v = 343$ м/с), то считается, что обнаружена неметаллическая ближняя цель.

4) В противном случае система делает вывод об отсутствии цели.

Результаты обрабатываются по логике условий AND и NOT, что позволяет гибко реагировать на сигналы от сенсоров. Для формализации логики система использует логические выражения:

- Индуктивное срабатывание:

$$L_{ind} = (d < d_{ind}) \quad (4)$$

- Ультразвуковое срабатывание:

$$L_{ultr} = (d < d_{ultr}) \quad (5)$$

- Объединённые логические условия:

Если индуктивный не сработал, а ультразвуковой сработал, значит цель не металлическая и находится на средней дистанции

$$\text{УЗ только} = \neg L_{ind} \wedge L_{ultr} \quad (6)$$

Где: L_{ind} – сигнал от индуктивного датчика; \neg – логическое «НЕ»; \wedge – логическое «И».

Если оба датчика ничего не зафиксировали, то поблизости нет объекта

$$\text{Ничего не обнаружено} = \neg L_{ind} \wedge \neg L_{ultr} \quad (7)$$

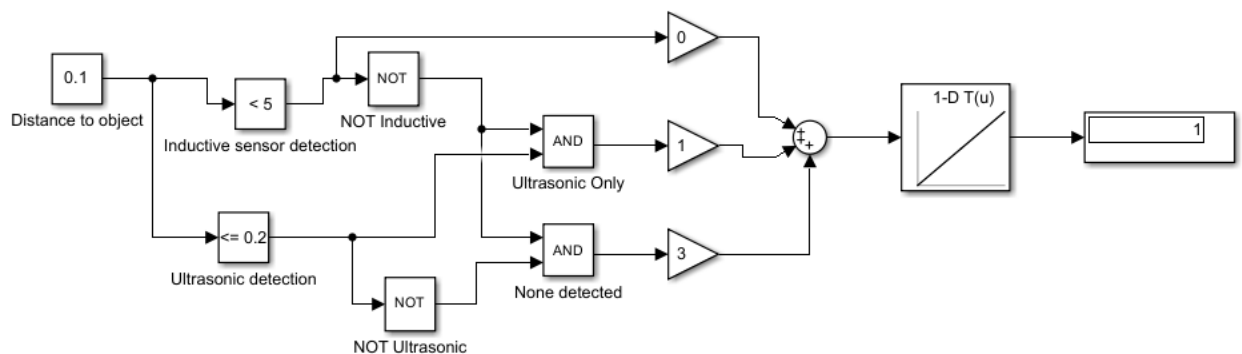


Рисунок 8 – Модель комбинированной системы обнаружения в Simulink

В модели на рисунке 8 реализована логика обработки сигнала в зависимости от расстояния до цели. Все условия представлены с помощью логических блоков (AND, NOT,

Relational Operator), а результат классификации поступает на блок 1-D Lookup Table, где происходит отображение итогов:

- значение 1 означает "обнаружен металл",
- 2 — "обнаружен объект (ультразвук)",
- 3 — "объект не обнаружен".

Таким образом, такая система позволяет адаптироваться под различные типы целей и условия местности, что особенно важно для роботизированных комплексов, работающих в реальных полевых условиях. Комбинированный подход не только повышает надёжность, но и минимизирует количество ложных срабатываний при обследовании территории.

Перспективы адаптации мирового опыта для вооружённых сил Казахстана.

Учитывая проведённый анализ сенсорных систем и реализацию комбинированных алгоритмов обнаружения в среде MATLAB Simulink, становится очевидным, что технологии разминирования можно не только исследовать, но и адаптировать под реальные условия с опорой на международный опыт. Сегодня, в условиях возрастающих угроз, модернизация инженерных подразделений вооружённых сил Казахстана требует интеграции роботизированных комплексов, способных выполнять задачи по обнаружению и нейтрализации взрывоопасных объектов с высокой степенью автономности и надёжности.

Опираясь на мировую практику, Казахстан имеет возможность не просто использовать готовые решения, но и создавать собственные адаптированные системы. Локализация передовых технологий, таких как мультисенсорные модули, основанные на индуктивных, ультразвуковых и оптических принципах, позволит адаптировать технику к климатическим условиям, характерным для степных и горных регионов страны. Примеры успешного применения подобных технологий в армиях США, ЕС, Китая и России подтверждают их эффективность как в боевых, так и в гуманитарных миссиях.

Возможные направления включают:

- лицензированное производство роботизированных платформ с дальнейшей доработкой под специфические условия Казахстана;
- создание совместных предприятий с зарубежными производителями;
- интеграцию сенсорных модулей в существующую технику, включая беспилотные наземные и воздушные аппараты.

Также стоит уделить внимание на развитие отечественных интеллектуальных роботизированных комплексов, способных не только выполнять разминирование, но и осуществлять разведку, охрану объектов и сопровождение колонн. Интеграция алгоритмов машинного обучения и обработки данных с датчиков в реальном времени существенно повысит эффективность и снизит уровень человеческого участия в опасных зонах.

Развитие собственной индустрии роботизированных комплексов для разминирования может обеспечить Казахстану не только военную независимость, но и перспективу выхода на международный рынок высокотехнологичных решений. Перспективными направлениями являются создание автономных наземных платформ, оснащённых системами искусственного интеллекта и машинного обучения, разработка мобильных комплексов, эффективных в степных и горных районах, а также интеграция современных сенсорных технологий. Кроме того, многофункциональные платформы, выполняющие не только разминирование, но и разведку, патрулирование и охрану объектов, могут существенно повысить уровень автоматизации военных операций. Достижение этих целей потребует комплексной поддержки со стороны государства, включая финансирование, создание нормативно-правовой базы и подготовку специалистов.

Интеграция роботизированных комплексов в военную инфраструктуру Казахстана должна включать развитие систем управления и связи, позволяющих эффективно координировать работу автономных платформ с инженерными подразделениями и беспилотными летательными аппаратами. Для успешного внедрения также необходимо

обеспечить обучение личного состава работе с новыми технологиями, развитие специализированных испытательных полигонов и создание сервисных центров для ремонта и технического обслуживания оборудования. Введение роботизированных систем позволит не только повысить боеспособность инженерных войск, но и минимизировать риски для саперов, сократить время разминирования территорий и улучшить координацию между подразделениями. Развитие отечественных технологий и их интеграция в вооруженные силы Казахстана предоставят стране возможность занять лидирующие позиции в области военных роботизированных систем и повысить общий уровень технологической независимости.

Заключение.

Анализ мирового опыта разработки и внедрения роботизированных комплексов для разминирования показывает, что такие технологии значительно повышают безопасность и эффективность операций по очистке территорий от мин и самодельных взрывных устройств. В ведущих странах, таких как США, Россия, Китай и государства Европейского Союза, активно применяются автономные и дистанционно управляемые платформы, оснащенные современными сенсорами, системами машинного обучения и интегрированные с беспилотными летательными аппаратами. Эти системы доказали свою эффективность в боевых условиях, гуманитарных миссиях и миротворческих операциях, что подтверждает их значимость для современных вооруженных сил.

Для Казахстана внедрение подобных систем открывает широкие перспективы в области оборонных технологий. Локализация передовых решений, таких как российский «Уран-6», американский TALON, европейская платформа iMUGS и китайский XJ-01, позволит адаптировать их под климатические и географические условия страны, а также повысить технологическую независимость. Одновременно с этим развитие отечественных решений, включая роботизированные платформы на базе БТР-80, квадроциклов и автономных наземных комплексов, обеспечит Казахстану возможность формирования собственного научно-технического потенциала в данной сфере.

Предлагаемое техническое решение в данной работе, стала комбинированная система обнаружения, основанная на использовании индуктивных и ультразвуковых датчиков. Такой подход позволяет повысить надёжность обнаружения, за счёт компенсации слабых сторон каждого отдельного сенсора. Модель этой системы была реализована в среде MATLAB Simulink, где проведённая логика продемонстрировала возможность точного определения объектов разного типа и на разных расстояниях. Использование подобных комбинированных сенсорных модулей на мобильных платформах позволит значительно повысить эффективность разминирования и снизить риски для личного состава.

Для успешного внедрения роботизированных систем разминирования в Казахстане необходимо учитывать ряд факторов: интеграцию с существующими военными структурами, развитие инфраструктуры для тестирования и технического обслуживания, а также подготовку специалистов, способных управлять и обслуживать такую технику. Важную роль играет и развитие законодательной базы, регулирующей использование автономных систем в военных и гуманитарных операциях. Инфраструктурные улучшения, включая модернизацию испытательных полигонов и создание централизованных хранилищ данных, позволят обеспечить эффективную координацию действий и повысить оперативность разминирования.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование алгоритмов автономного управления, повышение точности сенсорных систем и улучшение устойчивости роботизированных комплексов к экстремальным условиям эксплуатации. Кроме того, важно изучить возможности интеграции данных технологий с перспективными системами управления войсками и элементами искусственного интеллекта, что позволит существенно расширить их функциональные возможности. Современные тренды в области военной робототехники также показывают, что интеграция беспилотных летательных

аппаратов и роботизированных наземных платформ в единые комплексы позволит повысить общую эффективность разминирования.

Список литературы

1. Саймон П., Де Конинк С. (2014). Системы управления качеством в программах противоминной деятельности. Журнал по уничтожению обычных вооружений, 18(12).
2. Смит Дж., Браун П. (2021). Достижения в области роботизированного обнаружения мин. Журнал оборонных технологий.
3. Колин В. (2009). Европейское оборонное агентство — не ящик Пандоры, а великий эксперимент доброй воли. Оборона и стратегия, 9, 163–165.
4. Чжай Ч., Чжан П., Сюй Х., Юань С., Чжоу Л., У Ж. (2023). Применение и перспективы роботов в вооружённых силах США. 8-я Азиатско-Тихоокеанская конференция по интеллектуальным робототехническим системам (ACIRS), 24–28.
5. Кривцун В. (2024). Улучшение классификации дистанционно управляемых (роботизированных) средств разминирования. Научный журнал Национальной академии Национальной гвардии «Честь и закон».
6. Орынбет П., Разакова Д. (2024). Развитие и потенциал роботизации и автоматизации в автомобильной промышленности Казахстана: библиографический и аналитический обзор. Вестник университета «Туран».
7. Кыба Д., Дробот О., Веретильнык О., Харченко О. (2024). Некоторые аспекты процедуры оценки машин для гуманитарного разминирования. Научные труды ГНДИ испытаний и сертификации вооружения и военной техники.
8. Кривцун В., Нанивская Л. (2023). Факторы, влияющие на процесс разминирования. Журнал научных трудов «Социальное развитие и безопасность».
9. Ким Д., Манджунат П., Адэнсиран Э., Дэвис Дж. (2024). Схема сбора данных для разработки будущих автономных манипуляторов для военных приложений. 21-я Международная конференция по вездесущим роботам (UR), 2024.
10. Ян Ц., Инь Ю., Чэнь С., Лю Ю. (2021). Автономное исследование и навигация беспилотных катеров по борьбе с минами в сложной неизвестной среде. 33-я Китайская конференция по управлению и принятию решений (CCDC), 2021.
11. Фостер Л. (2021). Оптоэлектронные датчики для обнаружения СВУ. Журнал военной инженерии.
12. Лю Х., Чжао Ч., Чжу Цз., Гэ Цз., Дун Х., Лю Чж., Мрад Н. (2021). Активное обнаружение мелких целей, подобных НВП, с помощью измерения электромагнитных откликов с массивом магнитно-индуктивных датчиков. Журнал датчиков IEEE, 21, 23558–23567. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3093625
13. Петришор С., Симион М., Барсан Г., Ханку О. (2023). Гусеничный робот для гуманитарного разминирования: проектирование и динамическое моделирование. Журнал Machines, 11(5). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3093625
14. Хэ С., Лу М., Лю Ж., Чэнь Чж. (2022). Схема многофункционального поискового минного робота на основе инерциальной навигации. Материалы SPIE – Международное общество оптической инженерии, 12161, 121610В-121610В-6.
15. Ким Д., Манджунат П., Адэнсиран Э., Дэвис Дж. (2024). Схема сбора данных для разработки будущих автономных манипуляторов для военных приложений. 21-я Международная конференция по вездесущим роботам (UR), 208–213.
16. Афирацакун Н., Ливсакпайбун С. (2020). Управление движением iRobot Create2 на основе сенсоров. Материалы конференции PETI.
17. Фостер Л. (2022). TALON: многофункциональный робот для разминирования. Журнал военной робототехники.
18. Паллави Н.Р., Аканкш Г.С., Акаш К., Бхаргави Ш.Х., Мегана Р. (2024). Военное роботизированное наблюдение с использованием металлодетектора для обнаружения

наземных мин. Вторая международная конференция по информационным технологиям (ИСАИТ), 1–5.

19. Де Каббер Ж., Ле Флеше Э., Ла Грапп А., Дорофтэй Д. (2023). Взаимодействие между человеком и агентом в задаче пополнения ресурсов с участием беспилотных наземных систем. В: Факторы человека в роботах, дронах и беспилотных системах.

20. Глибев В., Жадан В., Королов В. (2022). Разработка тяжёлого боевого наземного робототехнического комплекса на базе бронетранспортёра БТР-4Е. Военно-технический сборник.

References

1. Simon, P., & De Coninck, S. (2014). Quality Management Systems in Mine Action Programs. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 18(12).

2. Smith, J., & Brown, P. (2021). Advancements in Mine Detection Robotics. *Journal of Defense Technology*.

3. Kolín, V. (2009). The European Defence Agency, Not a Pandora's Box but a Grand Experiment of Goodwill. *Obrana A Strategie (Defence and Strategy)*, 9, 163–165.

4. Zhai, C., Zhang, P., Xu, H., Yuan, X., Zhou, L., & Wu, R. (2023). The Application and Inspiration of Robots in the US Military. *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, 24–28.

5. Kryvtun, V. (2024). Improvement of the Classification of Remote-Controlled (Robotic) Means (Complexes) of Demining. *The Scientific Journal of the National Academy of National Guard "Honor and Law"*.

6. Orynbet, P., & Razakova, D. (2024). Development and Potential of Robotisation and Automation in Kazakhstan's Automobile Industry: A Bibliographical and Analytical Review. *Bulletin of "Turan" University*.

7. Kyba, D., Drobot, O., Veretilnyk, O., & Kharchenko, O. (2024). Certain Aspects of the Assessment Procedure of Machines for Humanitarian Demining. *Scientific Works of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment*.

8. Krivtun, V., & Naniivska, L. (2023). Factors Affecting the Demining Process. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*.

9. Kim, D., Manjunath, P., Adénxíran, E., & Davis, J. (2024). A Data Collection Scheme to Develop Future Autonomous Manipulation for Military Applications. *Proceedings of the 21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 208–213.

10. Yang, Q., Yin, Y., Chen, S., & Liu, Y. (2021). Autonomous Exploration and Navigation of Mine Countermeasures USV in Complex Unknown Environment. *Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*.

11. Foster, L. (2021). Optoelectronic Sensors for IED Detection. *Journal of Military Engineering*.

12. Liu, H., Zhao, C., Zhu, J., Ge, J., Dong, H., Liu, Z., & Mrad, N. (2021). Active Detection of Small UXO-Like Targets Through Measuring Electromagnetic Responses With a Magneto-Inductive Sensor Array. *IEEE Sensors Journal*, 21(20), 23558–23567. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3107842ResearchGate>

13. Petrişor, S. M., Simion, M., Bârsan, G., & Hancu, O. (2023). Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*, 11(5), 548. <https://doi.org/10.3390/machines11050548ScienceDirect+3MDPI+3MDPI+3>

14. He, X., Lu, M., Liu, R., & Chen, Z. (2022). The Scheme of Mine Search Multifunctional Robot Based on the Inertial Navigation. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 12161, 121610B–121610B-6.

15. Kim, D., Manjunath, P., Adénxíran, E., & Davis, J. (2024). A Data Collection Scheme to Develop Future Autonomous Manipulation for Military Applications. *Proceedings of the 21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 208–213.

16. Aphiratsakun, N., & Liwsakphaiboon, S. (2020). Path Control iRobot Create2 Based Sensors. Proceedings of PETI.
17. Foster, L. (2022). TALON: The Multi-Purpose Demining Robot. Military Robotics Journal.
18. Pallavi, N. R., Akanksh, G. S., Akash, K., Bharghavi, S. H., & Meghana, R. (2024). Robotic Military Surveillance Using Metal Detector for Land Mine Bomb Detection. Proceedings of the Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT), 1–5.
19. De Cubber, G., Le Flecher, E., La Grappe, A., & Doroftei, D. (2023). Human-Agent Teaming Between Soldiers and Unmanned Ground Systems in a Resupply Scenario. In Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems.
20. Glibov, V., Zhadan, V., & Korolov, V. (2022). The Development of a Heavy Class Combat Robotic Ground Complex Based on the BTR-4E Armored Personnel Carrier. Military Technical Collection.

МИНАДАН ТАЗАРТУҒА АРНАЛҒАН РОБОТТЫҚ КЕШЕНДЕРДІ ӘЗІРЛЕУДІҢ ӘЛЕМДІК ТӘЖІРИБЕСІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ҚОЛДАНУ

***Аңдатпа.** Мақалада миналардан және қолдан жасалған жарылғыш құрылғылардан аумақтарды тазалаудың қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған минадан тазартуға арналған роботты кешендерді әзірлеу мен енгізудің әлемдік тәжірибесіне талдау жасалды. Автономды және қашықтан басқарылатын жүйелерде қолданылатын заманауи технологиялар, соның ішінде сенсорлық кешендер, навигациялық жүйелер, жасанды интеллект элементтері және ұиқышсыз ұшу аппараттарымен интеграция қарастырылады.*

Зерттеу әдістемесі қолданыстағы шешімдерді салыстырмалы талдауға, оларды АҚШ, Ресей, Қытай және Еуропалық Одақ мемлекеттері сияқты жетекші елдерде қолдану тәжірибесін зерттеуге, сондай-ақ Жердегі платформаларды, мобильді роботтарды және ұиқышсыз ұшақтарды қоса алғанда, роботтық кешендердің әртүрлі түрлерінің тиімділігін бағалауға негізделген.

Жұмыстың практикалық бөлігі аясында минадан тазарту кезінде объектілерді жіктеудің сенімділігін арттыру мақсатында индуктивті және ультрадыбыстық датчиктерді біріктіретін біріктірілген сенсорлық анықтау жүйесінің математикалық моделі жүзеге асырылды. Даму MATLAB Simulink ортасында ұсынылған және отандық роботтық кешендердің құрамына интеллектуалды сенсорлық модульдерді одан әрі зерттеу және енгізу үшін негіз бола алады.

Сондай-ақ мақалада отандық роботтандырылған платформаларды әзірлеуді қоса алғанда, Қазақстандағы озық шешімдерді оқшаулау және бейімдеу перспективалары, өңірдің климаттық және географиялық ерекшеліктерін ескере отырып, шетелдік технологияларды пайдалану мүмкіндігі, сондай-ақ нормативтік-құқықтық базаны жетілдіру, инфрақұрылымды дамыту және осы жүйелерді тиімді енгізу үшін мамандар даярлау қажеттілігі қарастырылған. Автономды технологиялар, сенсорлық жүйелер және оларды әскери және гуманитарлық салаларға біріктіру саласындағы одан әрі зерттеулердің маңыздылығы атап өтіледі.

***Түйін сөздер:** минадан тазарту, миналар, роботты кешендер, қолдан жасалған жарылғыш құрылғылар, автономды жүйелер.*

ANALYSIS OF GLOBAL EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC SYSTEMS FOR DEMINING AND THEIR APPLICATION

***Abstract.** The article analyzes the world experience in the development and implementation of robotic mine clearance systems aimed at improving the safety and effectiveness of clearing*

territories of mines and improvised explosive devices. Modern technologies used in autonomous and remotely controlled systems, including sensor complexes, navigation systems, artificial intelligence elements and integration with unmanned aerial vehicles, are considered.

The research methodology is based on a comparative analysis of existing solutions, studying the practice of their application in leading countries such as the United States, Russia, China and the European Union, as well as evaluating the effectiveness of various types of robotic systems, including ground platforms, mobile robots and unmanned aerial vehicles.

As part of the practical part of the work, a mathematical model of a combined sensor detection system combining inductive and ultrasonic sensors has been implemented to increase the reliability of object classification during mine clearance. The development is presented in the MATLAB Simulink environment and can serve as a basis for further research and implementation of intelligent sensor modules in domestic robotic complexes.

The article also discusses the prospects for localization and adaptation of advanced solutions in Kazakhstan, including the development of domestic robotic platforms, the possibility of using foreign technologies considering the climatic and geographical features of the region, as well as the need to improve the regulatory framework, develop infrastructure and train specialists for the effective implementation of these systems. The importance of further research in the field of autonomous technologies, sensor systems and their integration into the military and humanitarian spheres is emphasized.

Keywords: mine clearance, mines, robotic complexes, improvised explosive devices, autonomous systems.

Авторлар туралы мәлімет

Ибраим Мерей Сатыпалдыұлы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Аспап жасау» мамандығы бойынша докторант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Мырзабеков Кенжебек Мырзабекович	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша докторант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Оралбек Жанай Жанқызы	Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша магистрант, Байланыс және ғарыштық инженерия институты, Алматы қ, Қазақстан, E-mail: zha.oralbek@aes.kz

Сведения об авторах

Ибраим Мерей Сатыпалдыұлы	Докторант по специальности «Приборостроение», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Мырзабеков Кенжебек Мырзабекович	Докторант по специальности «Космическая техника и технологии», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Оралбек Жанай Жанқызы	Магистрант по специальности «Космическая техника и технологии», Институт коммуникации и космической инженерии, Алматинский университет энергетике и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан, E-mail: zha.oralbek@aes.kz

Information about the authors

Merey Ibraim	Doctoral student in «Instrumentation», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: m.ibraim@aes.kz
Kenzhebek Myrzabekov	Doctoral student in «Space engineering and technology», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: k.myrzabekov@aes.kz
Zhanay Oralbek	Master's student in «Instrumentation», Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: zha.oralbek@aes.kz