

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра дискретной математики и информационных технологий

**СТРАТЕГИИ АТАКИ САМОДВИЖУЩИХСЯ МИН
КУРСОВАЯ РАБОТА**

студента 3 курса 321 группы
направления 09.03.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета КНиИТ
Голубкова Артема Анатольевича

Научный руководитель
доцент

В. В. Кирьяшкин

Заведующий кафедрой
доцент, к. ф.-м. н.

Л. Б. Тяпаев

Саратов 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Описание стратегий	5
1.1 Прямая	5
1.2 Зигзагообразная	6
1.3 Спиральная	7
1.4 Стратегия фланговой атаки	8
1.5 Стратегия Random	10
1.6 Спиральный зигзаг	11
2 Сравнительное исследование стратегий	13
2.1 Анализ стратегий при двух минах	14
2.2 Анализ стратегий при трёх минах	16
2.3 Сравнительный анализ эффективности стратегий	17
3 Направления для дальнейших исследований	23
3.1 Роевой интеллект	23
3.2 Ролевое моделирование поведения мин	24
3.3 Применение методов искусственного интеллекта	25
3.4 Моделирование в трёхмерном пространстве	25
3.5 Дополнительные предложения	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	28

ВВЕДЕНИЕ

Современные вооружённые конфликты наглядно демонстрируют возросшую роль автономных роботизированных систем в обеспечении наступательных и оборонительных задач. Всё более широкое распространение получают беспилотные катера, дроны-камикадзе и самодвижущиеся мины, используемые как для разведки, так и для прицельного поражения объектов [8]. Особенно перспективной представляется концепция мобильных мин, способных самостоятельно выбирать траекторию сближения с целью. Эти устройства позволяют создавать динамические минные поля и повышать тактическую гибкость на поле боя. Их применение уже активно обсуждается в военных кругах, а по масштабу влияния на тактику они сравниваются с введением авиации в XX веке.

Научное сообщество уделяет значительное внимание разработке моделей поведения автономных агентов в условиях неопределённости. В частности, в литературе представлены различные алгоритмы уклонения и преследования, патрулирования, а также построения эффективных маршрутов [9]. Исследования систематизируют методы поиска и маневрирования мобильных агентов. Также широко изучаются зигзагообразные и спиральные стратегии сближения, применяемые как в сервисной, так и в военной робототехнике [1]. Эти модели находят применение в задачах покрытия территории, уклонения от препятствий и построения траекторий максимальной живучести [4]. Современные работы в области ройного взаимодействия дополнительно показывают эффективность распределённых систем при согласованных действиях [2].

Цель курсовой работы — разработать и исследовать математические модели групповой атаки самодвижущихся мин на охраняемую цель с учётом активного противодействия стрелка-защитника. Для этого необходимо:

1. Сформулировать формальные описания шести стратегий движения мин: прямая, зигзагообразная, спиральная, комбинированная (зигзаг + спираль), случайная и фланговая .
2. Реализовать численное моделирование поведения каждой стратегии при фиксированных характеристиках защитника (его реакция и точность стрельбы задаются единообразно для всех экспериментов).
3. Оценить эффективность каждой стратегии по ключевым метрикам:

- доля успешных атак (мин, достигших цели);
 - число выживших мин (выбежавших из зоны поражения);
 - среднее время сближения с целью.
4. Сопоставить результаты моделирования и выявить закономерности между характером манёвра и итоговой эффективностью атаки.

1 Описание стратегий

В данной главе рассматриваются различные стратегии движения самоходных мин, используемых для сближения с целью. Выбор эффективной траектории имеет решающее значение при преодолении активной обороны: от характера движения мины зависят её шансы на достижение цели и выживание в процессе атаки.

Каждая стратегия представляет собой определённый поведенческий шаблон, реализующий ту или иную тактику приближения: от простого прямолинейного курса до сложных манёвров с элементами уклонения и обхода. Стратегии отличаются как геометрией траектории, так и уровнем сложности реализации.

В рамках исследования предполагается, что:

- цель (стрелок) зафиксирована в центре условного поля боя, координаты $(x_0, y_0) = (0, 0)$;
- мины инициализируются по равномерному распределению на окружности фиксированного радиуса R вокруг цели;
- каждая мина действует автономно, без взаимодействия с другими;
- защитник реагирует на приближение мин, пытаясь поразить их до достижения центра.

Таким образом, каждая мина стартует из точки $(x_i, y_i) = (R \cos \varphi_i, R \sin \varphi_i)$, где угол φ_i определяется равномерным делением окружности между n минами. Стартовое расположение соответствует классическим моделям обороны периметра, где противник окружён атакующими по кругу.

В следующих подразделах приведены математические модели движения для каждой стратегии, а также обсуждаются их преимущества и ограничения в условиях моделируемого конфликта. [1]

1.1 Прямая

Прямая стратегия представляет собой прямолинейное движение мины в направлении цели [7]. Предполагается, что цель находится в начале координат $(0, 0)$, а мина — в точке $\mathbf{r}(0)$. Тогда на каждом такте направление движения мины совпадает с вектором $\mathbf{r}(t)$, и её скорость определяется уравнением:

$$\dot{\mathbf{r}}(t) = -v \cdot \frac{\mathbf{r}(t)}{\|\mathbf{r}(t)\|},$$

где v — постоянная скорость мины.

Траектория движения:

$$\mathbf{r}(t) = (R_0 - vt) \cdot \frac{\mathbf{r}(0)}{R_0}, \quad R_0 = \|\mathbf{r}(0)\|.$$

Таким образом, мина движется по кратчайшей траектории — прямой к цели. Данный метод соответствует стратегии чистого преследования (Pure Pursuit), известной в задачах наведения и автономной навигации.

Преимущества:

- минимальное время сближения;
- простота реализации;
- эффективность при отсутствии сопротивления.

Недостатки:

- высокая предсказуемость;
- уязвимость для защитника;
- неэффективность против маневрирующей цели.

1.2 Зигзагообразная

Зигзагообразная стратегия включает периодические боковые отклонения от прямолинейного курса. Пусть \vec{u} — единичный вектор на цель, а \vec{w} — перпендикулярный ему вектор в плоскости. Тогда траектория мины задаётся приближённо следующим выражением:

$$\mathbf{r}(t) = (R_0 - vt) \vec{u} + A \sin(\omega t) \vec{w},$$

где:

- R_0 — начальное расстояние до цели;
- v — постоянная скорость мины в направлении цели;
- t — текущий момент времени (или шаг моделирования);
- A — амплитуда боковых колебаний (зигзагообразности);
- ω — угловая частота колебаний (определяет частоту смены направления);
- $\vec{r}(t)$ — радиус-вектор положения мины в момент времени t ;
- \vec{u} — единичный вектор на цель;
- \vec{w} — единичный вектор, перпендикулярный \vec{u} .

При этом угол курса $\theta(t)$ колеблется вокруг базового направления:

$$\theta(t) = \alpha(t) + A \cdot \sin\left(\frac{t}{T}\right),$$

где:

- $\alpha(t)$ — угол между текущим положением мины и целью (базовый курс);
- A — амплитуда углового отклонения;
- T — период колебаний (определяет, как часто меняется угол).

Такая стратегия имитирует поведение маневрирующих боеприпасов и используется для повышения живучести [7] за счёт усложнения прицеливания.

Преимущества:

- меньшая предсказуемость движения;
- усложнение наведения стрелка;
- повышенная выживаемость при приближении.

Недостатки:

- увеличенная длина траектории;
- снижение скорости сближения;
- более сложная реализация.

1.3 Спиральная

В данной стратегии мины движутся по спирали, постепенно приближаясь к цели. За счёт того, что радиальная составляющая ускоряет сближение, а тангенциальная вызывает вращательное движение, итоговая скорость увеличивается по мере приближения к центру. Это создаёт эффект «закручивания» траектории, при котором мина не только сокращает расстояние до цели, но и усложняет предсказание своего движения [11].

В каждый момент вектор скорости \vec{v} задается сочетанием радиальной и тангенциальной составляющих:

$$\vec{v} = v_r \vec{u}_r + v_\theta \vec{u}_\theta,$$

- $v_r = 1,5$ — модуль радиальной скорости, направленной к цели;
- $v_\theta = 3,0$ — модуль тангенциальной скорости, перпендикулярной направлению на цель (отвечает за вращательное движение);

- \vec{u}_r — единичный вектор в направлении от мины к цели;
- \vec{u}_θ — единичный вектор, ортогональный \vec{u}_r , задающий направление вращения вокруг цели;
- \vec{v} — результирующий вектор скорости;

Итоговая скорость нормируется (масштабируется) до $2v_0$, где v_0 — базовая скорость мины.

Преимущества:

- Высокая скорость сближения с целью за счет значительной радиальной составляющей.
- Сложная траектория, затрудняющая предсказание (благодаря сочетанию радиальной и тангенциальной скоростей).

Недостатки:

- Траектория полностью детерминирована (не содержит рандомизации) и становится предсказуемой при многократном использовании.

1.4 Стратегия фланговой атаки

В стратегии *Flank* каждая мина не движется по прямой к центру, а корректирует направление на цель на угол $\pm\pi/3$ (60°) [12]. Если мина в полярных координатах стартует под углом φ (точка $x = R \cos \varphi$, $y = R \sin \varphi$), то её базовый угол на центр равен $\varphi + \pi$. Применяя фланговый манёвр, итоговый угол движения задаётся как:

$$\alpha = \varphi + \pi \pm \frac{\pi}{3}.$$

где:

- α — результирующий угол направления флангового движения (либо влево, либо вправо от прямой на центр);
- знак “+” или “−” выбирается случайно или заранее определённым образом для распределения по флангам.

Предполагается, что мина движется прямолинейно и равномерно с постоянной скоростью v_0 .

Тогда координаты мины в момент времени t определяются как:

$$x(t) = R \cos \varphi + v_0 t \cos \alpha, \quad y(t) = R \sin \varphi + v_0 t \sin \alpha,$$

где:

- t — текущий момент времени;
- $x(t)$, $y(t)$ — координаты мины в момент времени t ;
- $\cos \alpha$, $\sin \alpha$ — проекции направления движения на оси x и y .

Траектория такой мины — прямая линия, направленная со смещением 60° от радиуса, что соответствует фланговому обходу цели (при $\alpha = \varphi + \pi \pm \frac{\pi}{3}$ — влево или вправо). Фланговые подходы часто рассматриваются в ройных системах как продвинутые манёвры для поиска слабых мест в обороне: мина будто «пробует» обойти защитника сбоку, а не атакует по самому короткому пути.

Преимущества:

- фланговая траектория позволяет атаковать центр под другим углом, минуя наиболее защищённую ось;
- центр обороны остаётся сравнительно слабозащищённым, что даёт шанс на прорыв;
- затрудняется точное прицеливание по мине, если защитник ориентирован на прямой путь.

Недостатки:

- траектория детерминирована и со смещением на фиксированный угол, предсказуема при известной стратегии;
- скорость $0.9v_0$ ниже максимальной;
- фланговый манёвр увеличивает расстояние до цели, давая больше времени на обнаружение и перехват.

Таким образом, стратегия *Flank* делает атаку менее прямолинейной и может обмануть защитника, сфокусированного на центре, но одновременно снижает скорость и увеличивает путь, что делает её более предсказуемой и медленной.

1.5 Стратегия Random

В стратегии *Random* мины движутся приближённо к центру, но с постоянными случайными угловыми отклонениями. Это делает траекторию зигзагообразной и непредсказуемой. Пусть:

- α_k — угол движения мины на k -м шаге (в радианах);
- $\alpha_0 = \varphi + \pi$ — начальный угол, направленный от точки старта (угол φ) к центру;
- δ_k — случайное угловое отклонение, выбираемое из равномерного распределения;

На каждом шаге k угол движения обновляется по правилу:

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \delta_k, \quad \delta_k \sim U(-1.5, 1.5),$$

где:

- $U(a, b)$ — равномерное распределение на отрезке $[a; b]$;
- δ_k — случайный шум, добавляемый к текущему углу α_k ;
- $[-1.5, 1.5]$ — диапазон шума в радианах (примерно $[-86^\circ, +86^\circ]$).

Положение мины обновляется по следующим уравнениям:

$$x_{k+1} = x_k + v_0 \cos(\alpha_k) \Delta t, \quad y_{k+1} = y_k + v_0 \sin(\alpha_k) \Delta t,$$

где:

- x_k, y_k — координаты мины на текущем шаге k ;
- x_{k+1}, y_{k+1} — координаты на следующем шаге;
- $\cos(\alpha_k), \sin(\alpha_k)$ — направления движения по осям x и y ;
- Δt — длительность одного временного шага моделирования.

Таким образом, траектория мины напоминает случайное блуждание, при этом оставаясь в среднем направленной к цели. Это делает стратегию *Random* аналогом стохастического поиска, схожего с поведением животных или разведывательных дронов [4] в условиях неполной информации.

Преимущества:

- угловой шум делает траекторию крайне непредсказуемой;
- затрудняется прицеливание и предсказание пути мины защитником;
- повышается вероятность «сюрпризного» приближения к цели.

Недостатки:

- отклонения от кратчайшего пути увеличивают время подхода;
- несмотря на хаотичность, статистическая структура шума может быть учтена защитником.

1.6 Спиральный зигзаг

В стратегии *Spiral Zigzag* каждая мина стартует с внешней окружности радиуса $R_0 = 350$ в точке, определяемой углом ϕ_0 . Движение происходит по спиральной траектории с дополнительным синусоидальным зигзагом, перпендикулярным радиальному направлению. Пусть:

- t — текущее время;
- $r(t)$ — расстояние от центра (радиус) на момент времени t ;
- $\phi(t)$ — угол в полярных координатах (в радианах);
- $A = 40$ — амплитуда зигзага;
- $\psi(t)$ — фаза зигзагообразного движения;
- x_0, y_0 — координаты центра сцены (цели).

Радиус убывает экспоненциально:

$$r(t) = R_0 e^{-kt}, \quad k = 0.15,$$

обеспечивая устойчивое приближение к центру с уменьшением скорости.

Угол $\phi(t)$ растёт линейно:

$$\phi(t) = \phi_0 + \omega t, \quad \omega = 0.02,$$

что означает плавное вращение мины по окружности (вправо или влево) во времени.

Дополнительно вдоль направления, перпендикулярного $\vec{r}(t)$, вводится зигзагообразное смещение с фазой:

$$\psi(t) = \psi_0 + \delta t, \quad \delta = 0.1,$$

где ψ_0 — индивидуально заданная начальная фаза для каждой мины (например, случайная). Это создаёт «шум» в боковых колебаниях между разными минами.

Итоговые координаты мины в декартовой системе:

$$x(t) = x_0 + r(t) \cos \phi(t) + A \sin(\psi(t)) \cos(\phi(t) + \frac{\pi}{2}),$$

$$y(t) = y_0 + r(t) \sin \phi(t) + A \sin(\psi(t)) \sin(\phi(t) + \frac{\pi}{2}).$$

Пояснение к членам в формулах:

- $r(t) \cos \phi(t)$ и $r(t) \sin \phi(t)$ — основное движение по экспоненциальной спирали;
- $\phi(t) + \frac{\pi}{2}$ — направление, перпендикулярное текущему радиусу;
- $A \sin(\psi(t))$ — зигзагообразное колебание вдоль перпендикуляра;
- (x_0, y_0) — координаты центра (например, цели или защитника).

Таким образом, стратегия *Spiral Zigzag* сочетает:

- **спиральное приближение** — создаёт плавное и устойчивое снижение расстояния до цели;
- **синусоидальное боковое смещение** — увеличивает вариативность траектории;
- **фазовый шум** (ψ_0) — предотвращает синхронизацию и делает поведение группы мин непредсказуемым.

Такая комбинация направленного и колебательного движения затрудняет прогнозирование траектории мины защитником, поскольку она не приближается к цели по прямой и не повторяет поведение других мин.

2 Сравнительное исследование стратегий

В рамках данной работы была проведена серия вычислительных экспериментов с целью всестороннего анализа и сравнительной оценки эффективности различных стратегий движения самодвижущихся мин в условиях моделируемой атаки на неподвижную мишень. Особое внимание было уделено проверке гипотез о том, как варьируется поведение системы при изменении количества мин и выборе того или иного алгоритма движения. Для достижения достоверных статистических результатов симуляция проводилась многократно — каждая стратегия запускалась по 200 раз, что позволило сгладить случайные колебания и выявить закономерности в поведении мин в рамках той или иной тактики атаки.

Все стратегии, за исключением одной, начинали движение с равномерно распределённых по окружности точек вокруг цели. Симуляция была реализована на языке Python: визуализация выполнялась с помощью библиотеки `pygame`, а расчёты логики движения осуществлялись с применением модулей `math`, `random` и `sys`.

Эксперименты проводились в контролируемой симуляционной среде, которая обеспечивает воспроизводимость условий и позволяет точно регистрировать все параметры поведения объектов. В процессе испытаний варьировались следующие ключевые параметры: количество мин (рассматривались случаи с двумя и тремя минами) и стратегия их движения (реализовано несколько алгоритмов, отличающихся логикой маршрута и взаимодействия с мишенью).

Каждый запуск представлял собой отдельный сценарий атаки, в котором мины, начиная из указанных стартовых положений, следовали предписанной стратегии. При этом фиксировались такие характеристики, как успешность уничтожения цели, количество выживших мин и среднее расстояние между ними в процессе атаки — всё это позволяло комплексно оценить эффективность каждой стратегии.

Целью данных экспериментов было выявление преимуществ и недостатков различных стратегий в условиях, приближенных к реальным боевым задачам, а также понимание того, каким образом число мин влияет на вероятность успешной атаки и устойчивость системы в целом. Важным аспектом анализа стало также сравнение поведения мин при наличии разведчика

или координирующего агента, а также при наличии эффекта взаимодействия между минами.

Полученные результаты были сгруппированы по количеству мин, что позволило отдельно рассмотреть особенности поведения системы при наличии двух и трёх атакующих единиц. Ниже приводятся подробные результаты анализа для каждого из этих случаев.

2.1 Анализ стратегий при двух минах

На рисунке 1 представлена эффективность стратегий по доле успешно уничтоженных целей при двух минах. Видно, что наилучшие результаты показали стратегии «Спиральный зигзаг» (37,5%) и «Спираль» (35,5%). Стратегия «Зигзаг» продемонстрировала умеренный успех (17,5%), тогда как «Фланг» и «Рандом» оказались менее эффективными (около 5,5% и 3,5% соответственно). При использовании «прямого алгоритма» (прямая атака) ни разу не удалось уничтожить цель (0% успеха).

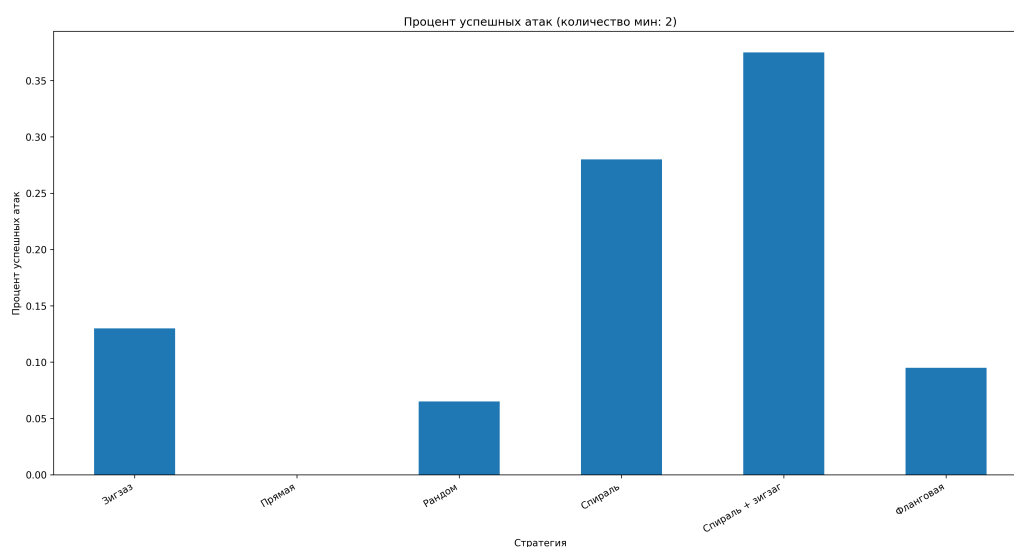


Рисунок 1 – Успешность атак при двух минах для различных стратегий

Рисунок 2 иллюстрирует среднее число выживших мин после атаки. Стратегия «Спиральный зигзаг» обеспечивает наибольшее число выживших (1,03 из 2 мин в среднем), что существенно выше, чем у других стратегий. «Спираль» сохраняет в среднем 0,37 мины, а стратегии «Зигзаг», «Фланг» и «Рандом» — примерно по 0,17, 0,07 и 0,05 мин соответственно. Для «Прямого алгоритма» среднее число выживших равно нулю (мины всегда терялись без уничтожения цели).

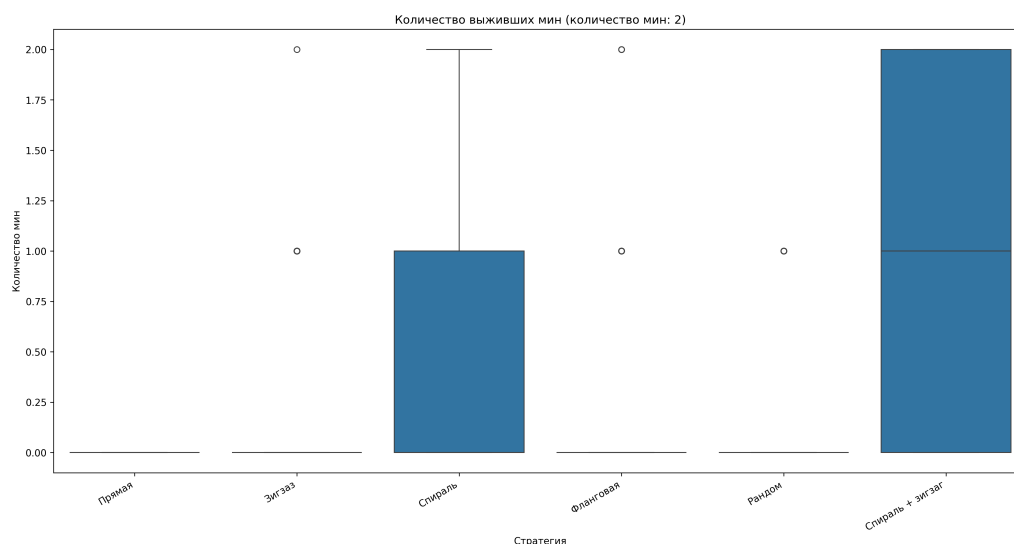


Рисунок 2 – Диаграмма размаха: среднее число выживших мин при двух минах

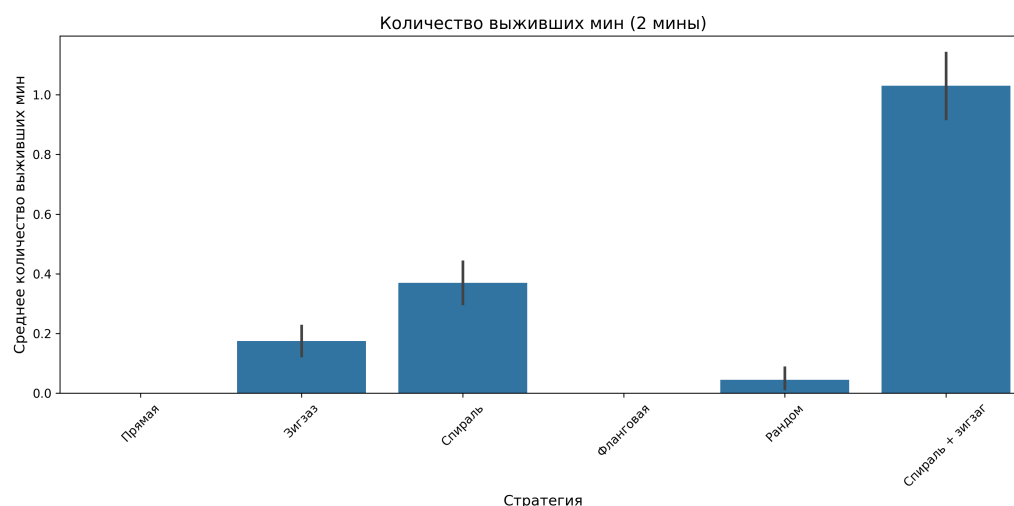


Рисунок 3 – Гистограмма: среднее число выживших мин при двух минах

Стратегия «Прямая» при двух минах показала 0% успешных атак. Среднее число выживших мин равно 0 (все мины терялись в процессе атаки).

Стратегия «Зигзаг» показала успешность 17,5% при двух минах. Среднее число выживших мин около 0,175 (то есть в среднем чуть меньше 0,2 мины из двух переживают атаку).

Стратегия «Рандом» продемонстрировала низкую успешность 3,5%. Среднее число выживших мин 0,045 (мины почти всегда теряются).

Стратегия «Спираль» при двух минах имеет высокую успешность 35,5%. Среднее число выживших мин примерно 0,37 (около трети мин в среднем остаются).

Стратегия «Спираль+Зигзаг» показала наибольший процент успешных атак 37,5%. Среднее число выживших мин 1,03 (из двух), что является максимальным среди всех стратегий. Таким образом, «Спираль+Зигзаг» обеспечивает наилучший баланс между выживаемостью мин и успехом атаки.

2.2 Анализ стратегий при трёх минах

При добавлении третьей мины эффективность стратегий заметно растёт. Рисунок 4 демонстрирует, что при трех минах наибольшую успешность показывают стратегии «Спиральный зигзаг» (94,0%) и «Зигзаг» (90,5%). Стратегии «Спираль» (78,5%), «Фланг» (69,5%) и «Прямой алгоритм» (50,5%) демонстрируют умеренный успех, а «Рандом» показывает наименьшую эффективность (31,0%).

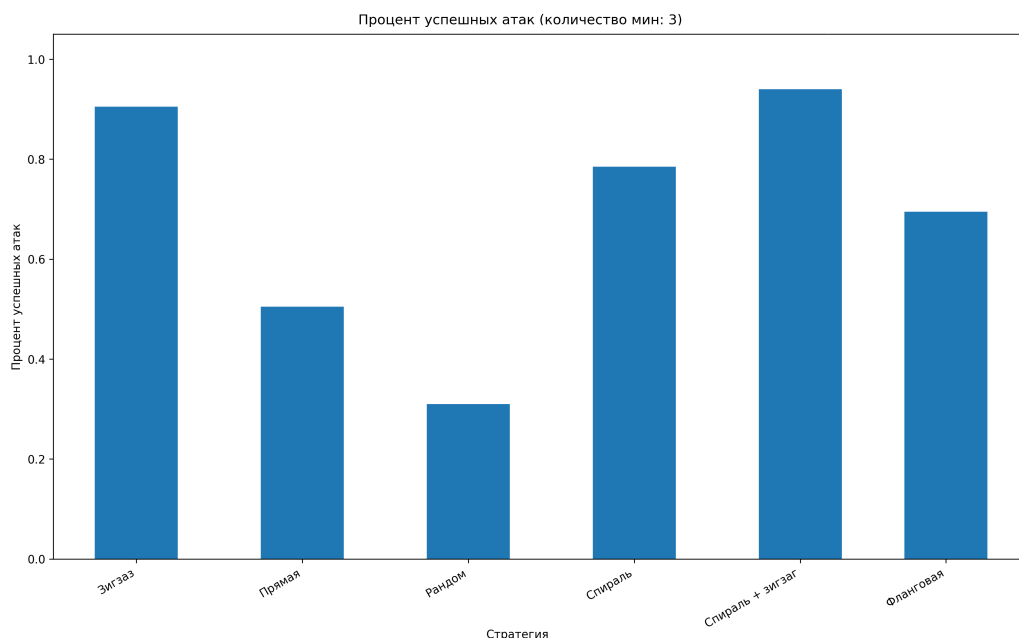


Рисунок 4 – Успешность атак при трех минах для различных стратегий

Рисунок 5 иллюстрирует среднее число выживших мин при трех минах. Стратегия «Спиральный зигзаг» обеспечивает наибольшее значение, что существенно превосходит остальные. «Зигзаг» и «Спираль» дают около 1,265 и 1,200 выживших мин соответственно. Для «Фланга» 0,945. У «Прямого» алгоритма среднее выживших 0,545, а у «Рандом» 0,405.

При трех минах **стратегия «Прямая»** показала успешность 50,5%. Среднее число выживших мин 0,545 (то есть в среднем около 0,5 мины из 3 остаются).

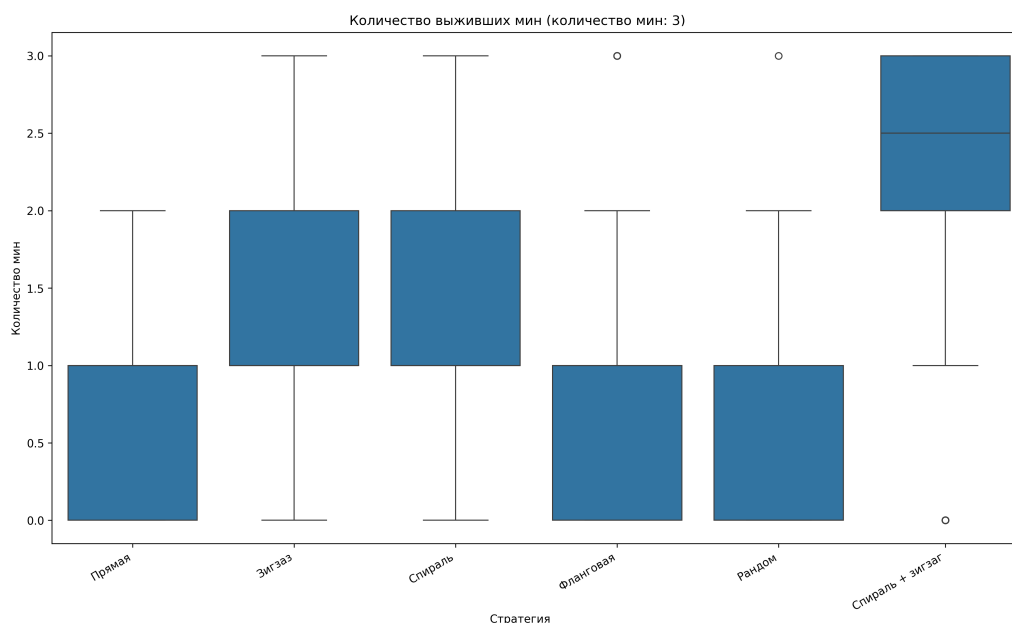


Рисунок 5 – Диаграмма размаха: среднее число выживших мин при трёх минах

Стратегия «Зигзаг» при трех минах показала высокую успешность 90,5%. Среднее число выживших мин 1,265 (около 1,3 мины из 3 в среднем остаются живы).

Стратегия «Рандом» при трех минах продемонстрировала успешность 31,0%. Среднее число выживших мин 0,405.

При трех минах **стратегия «Спираль»** имеет успех 78,5%. Среднее число выживших мин 1,200.

«Спираль+Зигзаг» при трех минах показал успех 94,0%. Среднее число выживших мин 2,285 (наибольшее из всех стратегий).

Стратегия «Фланг» при трех минах достигает 69,5% успешных атак. Среднее число выживших мин 0,945.

2.3 Сравнительный анализ эффективности стратегий

Данный анализ опирается на два ключевых показателя: доля успешных атак мин (процент атак, достигнувших цели) и среднее число выживших мин. Эти величины рассматриваются в зависимости от количества мин (от 2 до 10). Используя статистические данные по шести стратегиям движения мин, сравним их эффективность и выживаемость при разных размерах отряда.

- *Процент успешных атак.* Отражает результативность стратегии – какую долю мин достигла цели. Высокий процент успешных атак указы-

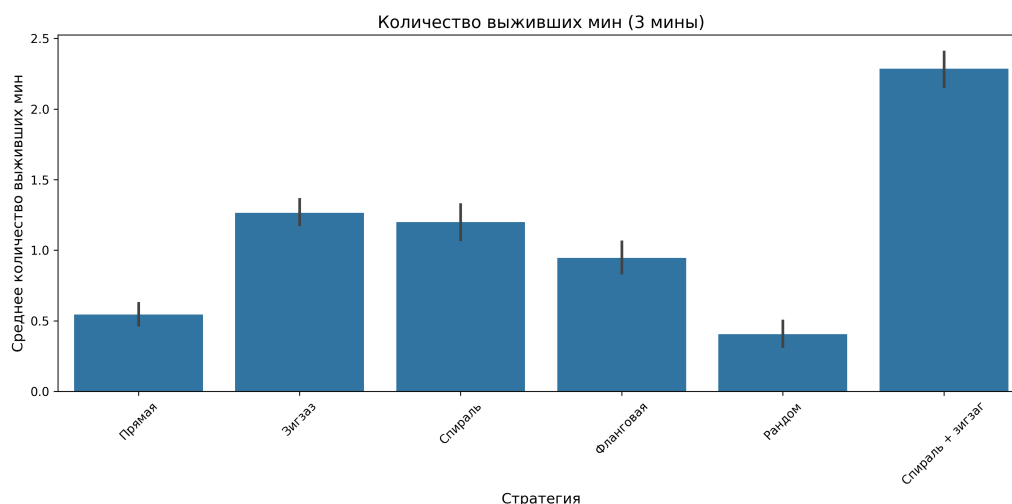


Рисунок 6 – Гистограмма: среднее число выживших мин при трёх минах

вает на высокую эффективность.

- *Среднее число выживших мин.* Иллюстрирует выживаемость мин до конца сценария. Большое число выживших означает, что стратегия позволяет большему числу мин избегать уничтожения.

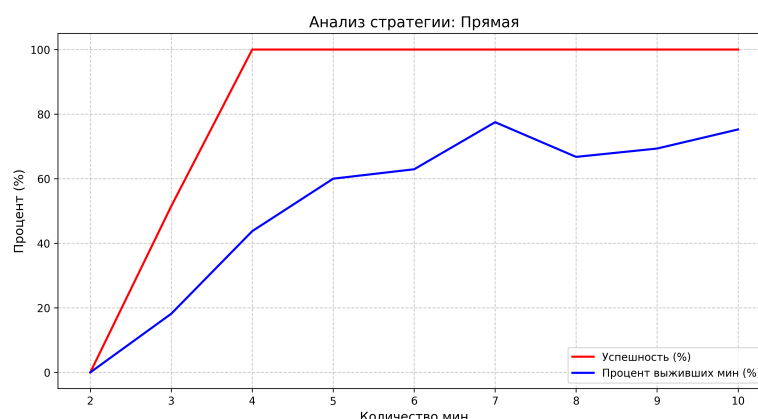


Рисунок 7 – Зависимость процента успешных атак и среднего числа выживших мин от количества мин для стратегии «Прямая»

Стратегия «Прямая». При прямолинейном движении мины движутся напрямую к цели без уклонений. Такая стратегия облегчает обнаружение и перехват мин оборонительными системами, поэтому процент успешных атак сравнительно невысок. По данным статистики, при малом числе мин (2–3) эффективность этой стратегии ниже, чем у альтернативных тактик, и с увеличением числа мин шанс на успех увеличивается. Среднее число выживших мин в этой стратегии относительно велико по сравнению с другими: поскольку мины движутся без лишних манёвров, часть из них избегает уничтожения.

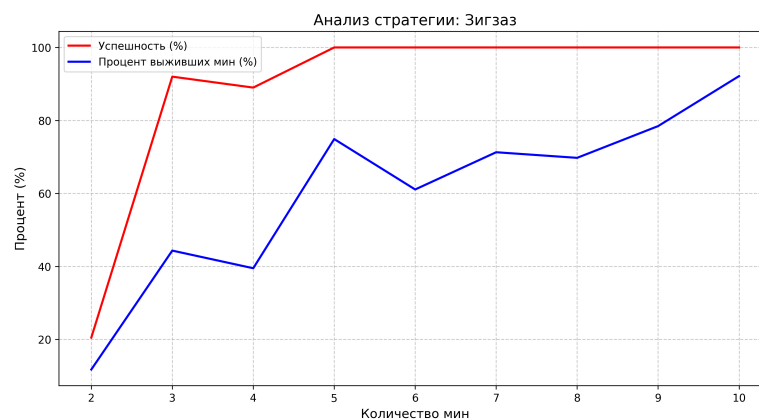


Рисунок 8 – Зависимость процента успешных атак и среднего числа выживших мин от количества мин для стратегии «Зигзаг»

Стратегия «Зигзаг». Мины движутся по зигзагообразной траектории, что делает их путь менее предсказуемым для систем защиты. Это повышает эффективность: при небольшом числе мин процент успешных атак заметно превышает значение для стратегии «Прямая». При росте числа мин «Зигзаг» демонстрирует более устойчивую результативность: доля успеха постепенно снижается, но остаётся выше, чем у большинства других стратегий. Число выживших мин у «Зигзага» также относительно велико: зигзагообразное движение позволяет минам эффективнее уклоняться от огня.

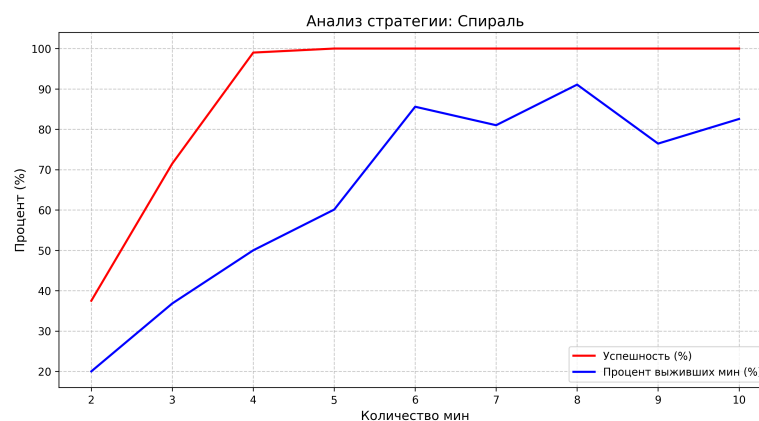


Рисунок 9 – Зависимость процента успешных атак и среднего числа выживших мин от количества мин для стратегии «Спираль»

Стратегия «Спираль». При спиральном движении мины также избегают прямого курса, закручиваясь вокруг цели. Эта стратегия демонстрирует результаты, схожие с «Зигзагом»: процент успешных атак выше, чем у «Прямой», и заметно устойчивее при увеличении числа мин. При небольшом числе мин «Спираль» обеспечивает высокий процент успеха, аналогичный

«Зигзагу», а по мере роста группы этот процент немного снижается, но остаётся относительно высоким. Среднее число выживших мин для «Спирали» сравнительно велико, так как спиральная траектория даёт минам дополнительный шанс уклоняться от огня.

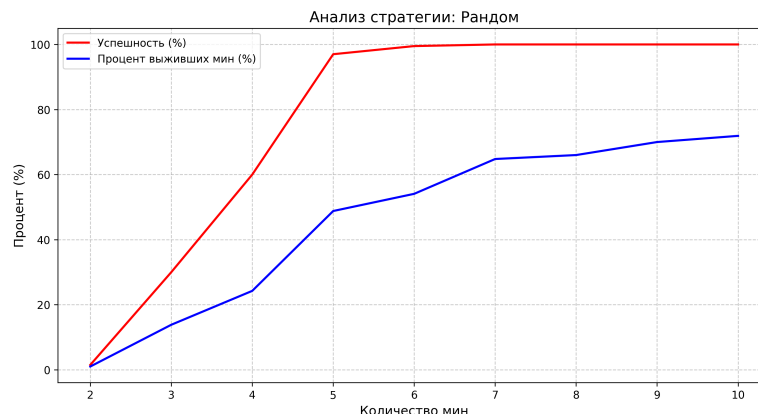


Рисунок 10 – Зависимость процента успешных атак и среднего числа выживших мин от количества мин для стратегии «Рандом»

Стратегия «Рандом». Случайное движение мин не следует определённому образцу. По представленным данным стратегия «Рандом» показывает средние результаты: процент успешных атак ниже, чем у нацеленных стратегий («Спираль», «Зигзаг» и их комбинация), но выше, чем у «Прямой». При увеличении числа мин «Рандом» демонстрирует рост эффективности, эта стратегия отличается относительно высоким средним числом выживших мин. Шумовые отклонения траектории позволяют некоторым минам уходить от обстрела, что повышает их шансы на выживание.

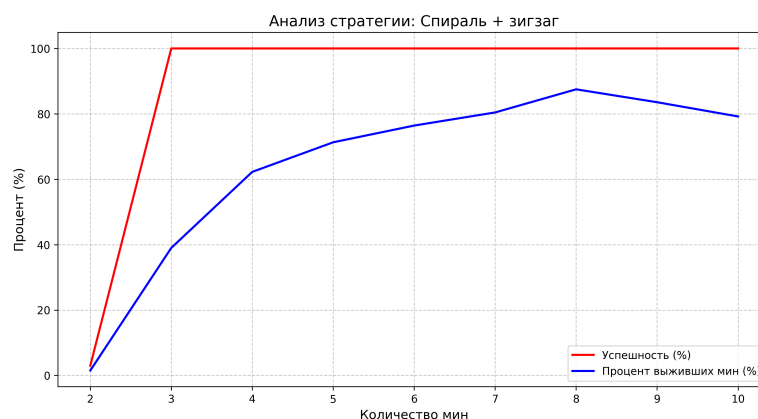


Рисунок 11 – Зависимость процента успешных атак и среднего числа выживших мин от количества мин для стратегии «Спираль + Зигзаг»

Стратегия «Спираль + Зигзаг». Комбинированная стратегия со-

четаает элементы «Спирали» и «Зигзага». По статистике она демонстрирует наивысшую эффективность среди рассматриваемых: даже при большом числе мин процент успешных атак остаётся высоким. Однако такая результативность достигается ценой выживаемости: среднее число выживших мин для этой стратегии обычно ниже, чем у остальных. На рисунке 11 видно, что синяя кривая лидирует, а оранжевая заметно ниже, чем у прочих стратегий.

Сравнение стратегий при малом числе мин. Отдельно рассмотрим результаты при 2 и 3 минах, где различия между стратегиями особенно заметны. На рисунках 12 и 13 приведены сравнительные показатели всех стратегий для 2 и 3 мин соответственно. При 2 минах все стратегии отрабатывают с переменным успехом, однако уже при 3 минах видно, что стратегии со сложными траекториями (например, «Спираль+Зигзаг» и «Зигзаг») опережают остальные по эффективности, демонстрируя более высокую результативность даже при небольшом составе.

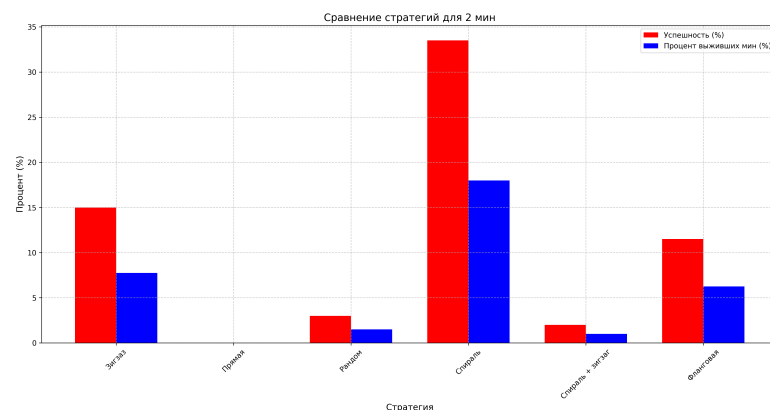


Рисунок 12 – Сравнение доли успешных атак и числа выживших мин для разных стратегий при 2 минах

Выводы. Обобщая сравнительный анализ, можно отметить следующие основные тенденции:

- Наивысший процент успешных атак демонстрирует комбинированная стратегия «Спираль+Зигзаг», за ней следуют «Зигзаг» и «Спираль». Это говорит о том, что изменяющиеся траектории повышают результативность.
- Стратегия «Прямая» обеспечивает минимальную долю успешных атак, но при этом сохраняет относительно большое число выживших мин, поскольку мины избегают рискованных манёвров.
- «Рандом» стратегии занимают промежуточное положение: они дают

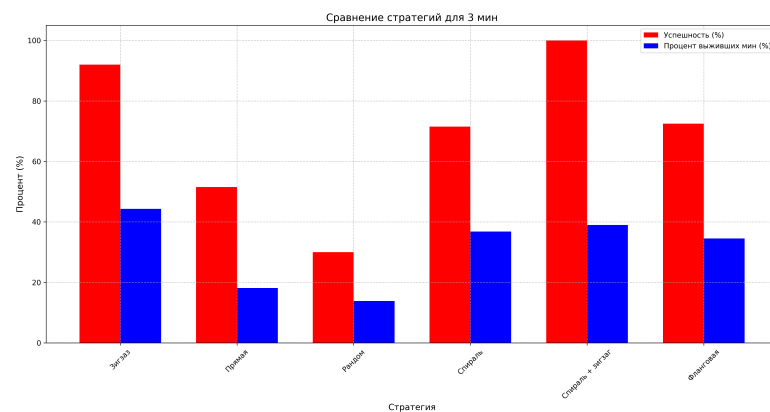


Рисунок 13 – Сравнение доли успешных атак и числа выживших мин для разных стратегий при 3 минах

умеренно высокий успех при среднем уровне выживаемости.

3 Направления для дальнейших исследований

Для дальнейшего развития проекта симуляции атакующих мин, применяющих различные стратегии, можно предложить следующие ключевые направления:

3.1 Роевой интеллект

Внедрение концепции роевого интеллекта в моделирование поведения группы атакующих мин способно заметно повысить эффективность и адаптивность системы. В таких системах каждый агент действует на основе локальной информации и простых правил взаимодействия, что приводит к возникновению сложного коллективного поведения всей группы [2]. При этом за счёт децентрализованного характера управления достигается высокая устойчивость к потерям отдельных мин: отсутствие центрального узла позволяет воспринимать каждую потерю как обычную флуктуацию, не приводящую к сбою системы [3].

Локальная координация также облегчает синхронизацию действий группы и упрощает принятие решений в условиях отсутствия централизованного контроля, поскольку каждая мина может оперативно реагировать на изменения в окружающей среде.

Примеры потенциальных эффектов роевой координации включают:

- **Спонтанное окружение цели:** скоординированные действия группы мин могут приводить к окружению или блокированию цели без участия центрального контроллера.
- **Адаптация к динамическим препятствиям:** при появлении новых препятствий агенты оперативно перестраивают траектории движения, сохраняя цель в зоне охвата группы.
- **Реакция на внезапные угрозы:** при обнаружении угроз агенты быстро перегруппировываются или рассеиваются, минимизируя собственные потери.

Роевые системы особенно перспективны в условиях помех связи и ограниченного обзора: короткодействующая локальная коммуникация и обмен сигналами на малых расстояниях уменьшают влияние шумов и помех в каналах связи. К тому же они легко масштабируются вплоть до десятков агентов (или даже сотен): добавление новых мин в систему не требует перестройки

правил координации и не снижает общую устойчивость благодаря избыточности ресурсов.

Такие особенности делают роевой подход привлекательным в задачах, где необходимо быстрое и адаптивное поведение группы без централизованного управления.

3.2 Ролевое моделирование поведения мин

Разделение мин на различные роли позволит организовать более гибкое и специализированное взаимодействие. Так, разведчики могут быстро исследовать местность и передавать координаты цели, атакующие — непосредственно нацелены на уничтожение врага, а отвлекающие (обманные) создают ложные сигналы или манёвры для отвлечения внимания. Возможно также выделение ролей *сборщиков* или *координаторов*, которые управляют движением и временем атаки группы.

Ролевой подход упрощает организацию сложных задач: как показано у Lhaksmana и соавторов, поведение агентов удобно представлять в виде ролей с возможностью адаптивного переключения.

В сценарии «Поиск и уничтожение» мины могут формировать группы вокруг цели: *«Цель рекрутеров – искать других агентов, пока вокруг обнаружившего цель рекрутера не соберётся достаточно большая группа для уничтожения объекта»*. Такие стратегии напоминают поведение в муравейниках и стаях, где простые правила на уровне индивида приводят к мощному коллективному эффекту.

Типы ролей мин:

- **Разведчики (scouts):** быстро перемещаются по полю боя, оценивают позицию врага, передают информацию другим минам.
- **Атакующие (attackers):** действуют по обнаруженным координатам, строят траектории приближения к цели.
- **Отвлекающие (decoys):** создают ложные сигналы, сбивают защиту с толку, привлекая внимание.
- **Сборщики / координаторы:** направляют групповой манёвр, координируют действия, обеспечивают окружение цели.

Такой подход способствует разработке алгоритмов координации. Например, разведчики могут инициировать переход атакующих в состояние «сборки» для синхронного удара. Ролевое моделирование упрощает глобаль-

ное управление роем, стимулируя самосогласованные стратегии.

3.3 Применение методов искусственного интеллекта

Введение ИИ позволит формировать более сложные и адаптивные стратегии поведения как мин, так и оппонентов [6]. Подходы, такие как глубокое обучение с подкреплением (Deep RL) и генетические алгоритмы, применимы для оптимизации траекторий и тактик.

- **Расширение пула стратегий:** обучение сети новым паттернам поведения через соревнования или эволюционные методы.
- **Сбор данных:** создание датасетов успешных действий для имитационного обучения агентов.
- **Обучение противодействию:** симметричное обучение (self-play) между минами и врагом.

Как показано в ряде работ, DRL эффективно используется для координации беспилотников при мониторинге, обеспечивая адаптацию к нестандартным ситуациям и снижая детерминированность поведения [5].

3.4 Моделирование в трёхмерном пространстве

Текущая модель является двумерной, что подходит для морских или наземных сценариев. Переход к трёхмерной симуляции позволит изучать воздушные бои и поведение глубинных мин.

Преимущества 3D-моделирования:

- Возможность атаки с высоты или облёта укрытий.
- Использование рельефа местности.
- Реализация в платформах Gazebo, AirSim или Unity3D.

Например, в работе Su et al. реализован высокоточный симулятор квадрокоптера в Unity 3D с учётом датчиков и физики, что даёт возможность реализовать комплексные атаки с вариацией высоты.

3.5 Дополнительные предложения

- **Эмуляция РЭБ:** добавление помех на сенсоры и каналы связи (например, имитация глушения GPS) для проверки устойчивости стратегий.
- **Сложные сценарии:** моделирование нескольких целей (стационарных и движущихся), задача распределения мин между целями (target allocation), прогнозирование движения целей.

Такие сценарии требуют анализа баланса между индивидуальной и групповой эффективностью, что расширяет возможности исследования кооперативного поведения мин в динамически изменяющихся условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного анализа шести алгоритмов движения выяснилось, что «прямая» траектория обеспечивает минимальное время сближения, но крайне уязвима к одиночным выстрелам защитника. Случайная стратегия в целом показала наихудшие показатели по доле успешных атак и времени, тогда как комбинированный зигзаг + спираль даёт наилучший баланс между скоростью и выживаемостью: она сохраняет относительно высокую скорость приближения и при этом значительно снижает предсказуемость траектории. Зигзагообразный и чисто спиральный манёвры увеличивают время в пути, но заметно повышают шансы мин на прорыв за счёт усложнения прицеливания защитника. Таким образом, выбор оптимальной стратегии определяется компромиссом между быстродействием и живучестью: комбинированный алгоритм можно рекомендовать как наиболее универсальный при стандартных настройках защитника, а для задач, где критична скорость, уместно использовать «Прямую» тактику. Полученные результаты могут лечь в основу дальнейшей разработки адаптивных систем управления группой автономных боевых элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Odor Source Localization with Mobile Robots; Thomas Lochmatter, Xavier Raemy, Alcherio Martinoli; In Bulletin of the Swiss Society for Automatic Control, (2007), с. 11-14
- 2 Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M. (2013). Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*, 7, 1–41.
- 3 Gazi, V., Passino, K. M. (2004). Stability analysis of swarms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(4), 692–697
- 4 Codling, E. A., Plank, M. J., Benhamou, S. (2008). Random walk models in biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(25), 813–834.
- 5 Yang, S., Gu, D. (2004). Multi-agent reinforcement learning for multi-robot systems: A survey. Technical Report, University of Essex.
- 6 Душкин Р.В., Андоронов М.Г. - Использование методов искусственного интеллекта для организации беспилотного движения// Тренды и управление. -2020. -№1. - С.51-58
- 7 Parnell, G. S., et al. (2001). Advanced Concepts in Maneuvering Targets and Evasion. *Military Operations Research*, 6(1).
- 8 UNIDIR (2020). Swarm Robotics: Technical and Operational Overview. United Nations Institute for Disarmament Research.
- 9 Латыпов Р. А., Ахметшин И. И. Методы и алгоритмы навигации автономных мобильных роботов. — Казань: Казанский федеральный университет, 2020.
- 10 Володин А. В. и др. Программно-аппаратная реализация коллективного управления мобильными роботами // Вестник ЮУрГУ. Серия "Вычислительная математика и информатика 2015.
- 11 Liang, J., Xiao, J. (2008). A real-time spiral path planning algorithm for cleaning mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 799–803.

- 12 Cai H., Ma F., Ni R., Xu W., Gao H. Bio-Inspired Swarm Confrontation Algorithm for Complex Hilly Terrains // Biomimetics. — 2025. — Vol. 10, No. 5, article 257.

Курсовая работа "Стратегии атаки самодвижущихся мин" выполнена мною самостоятельно, и на все источники, имеющиеся в работе, даны соответствующие ссылки.

подпись, дата

инициалы, фамилия