

Метод дискретизации и оптимизации точек базирования при планировании маршрутов наземных робототехнических комплексов для диагностики энергетических объектов

Я.В. Бренчук, С.А. Ерошенко

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург*

Аннотация: Надежность работы энергетических объектов напрямую связана с полнотой и регулярностью контроля технического состояния оборудования. Традиционные методы, основанные на визуальном осмотре и выборочных измерениях, характеризуются высокой трудоемкостью, низкой воспроизводимостью и рисками для обслуживающего персонала. В этих условиях возрастает актуальность применения мобильных робототехнических комплексов, способных выполнять обследование подстанций и другого энергооборудования в автоматизированном режиме. Ключевым фактором эффективности робототехнических комплексов является качество построенного маршрута: полнота охвата оборудования для получения диагностически значимой информации. В работе предложен метод дискретизации и оптимизации точек базирования, обеспечивающие формализованное построение маршрутов обследования. Метод включает последовательное применение ряда алгоритмов: геометрическую дискретизацию допустимой области движения на основе регулярной сетки, фильтрацию точек с учетом технических ограничений РТК и зон запрета, моделирование зон видимости с применением упрощенных коллайдеров и количественной оценки качества видимости, а также оптимизацию множества базовых точек как задачи покрытия. Эффективность метода подтверждена на трехмерной модели подстанции: проведенные сценарные испытания показали сокращение числа базовых позиций более чем в четыре раза при сохранении высокой полноты охвата (не менее 97 %). Практическая ценность заключается в возможности интеграции предложенных методов в состав интеллектуальных подсистем диагностики и технического контроля, что обеспечивает снижение трудозатрат, повышение воспроизводимости маршрутов и улучшение качества автоматизированной диагностики в энергетике.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, диагностика оборудования, построение маршрута, обследование оборудования, задача покрытия, автоматизация технологического процесса.

Введение

Надежная эксплуатация электроэнергетических объектов напрямую зависит от состояния оборудования и полноты выполняемых диагностических мероприятий [1]. Традиционные методы визуального осмотра сопряжены с высокими рисками для персонала и не всегда обеспечивают воспроизводимость результатов [2,3]. Активно развиваются

робототехнические средства диагностики. В статьях [4, 5] приведены обзоры использования наземных мобильных робототехнических комплексов (РТК), на объектах электроэнергетики. Одним из перспективных направлений развития является применение РТК, выполняющих обследование территории подстанции и оборудования на основе заранее заданного маршрута. В работе [6] показана возможность автоматической инспекции электрической подстанции с помощью РТК в различных погодных условиях. Важным направлением развития РТК для мониторинга подстанций является использование камер различных спектров [7] и обеспечение высокой точности наведения камер на элементы электрооборудования [3]. При этом собираемые с помощью РТК данные имеют графический формат и требуют применения методов интеллектуального анализа, без применения которых автоматизируется только процесс сбора данных [8, 9].

Использование РТК позволяет исключить прямое участие человека в обследовании опасных участков и обеспечить воспроизводимость диагностических процедур. Эффективность таких систем определяется качеством построения маршрута, от выбора позиций точек сбора данных (точек базирования), зависит полнота охвата и возможность получения диагностически значимых данных.

В отличие от классических задач планирования пути, где основное внимание уделяется минимизации времени движения, длины траектории или обходу препятствий, задачи технической диагностики имеют свою специфику. Ключевым критерием является не только длина маршрута, но и гарантированное покрытие всех целевых объектов наблюдения при сохранении технической реализуемости движения [2]. Это определяет необходимость разработки методов формализации пространства перемещения, выбора допустимых точек базирования и оценки качества зон видимости.

Существующие решения в области построения маршрутов РТК ориентированы на робототехнические приложения общего назначения: логистику, сервисные задачи или транспортные системы. Такие подходы опираются на жадные эвристические алгоритмы, такие как A^* [10], алгоритмы на основе быстрых случайных деревьев (Rapidly-Exploring Random Tree – RRT) [10] или разнообразные метаэвристические алгоритмы, которые не учитывают специфику диагностики энергетического оборудования. В работах по инспекции энергообъектов предлагаются модели обхода и построения карт, однако отсутствует строгая математическая формализация выбора точек базирования и количественной оценки полноты диагностического охвата.

Для восполнения этого пробела в данной работе предложен метод, ориентированный на математическую дискретизацию области допустимого движения, фильтрацию точек по техническим ограничениям РТК, анализ зон видимости на основе упрощённых геометрических моделей и оптимизацию множества базовых позиций как задачи покрытия. Такой метод позволяет перейти от эвристических схем маршрутизации к формализованной процедуре, обеспечивающей воспроизводимость решений и интеграцию в цифровые двойники энергетических объектов.

Целью исследования является разработка математического метода дискретизации и оптимизации точек базирования, обеспечивающего построение маршрутов обследования энергетических объектов с использованием мобильных РТК.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- исследование методов автоматизации контроля технического состояния оборудования энергетики и определение требований к построению многоуровневой системы управления РТК;

- формализация принципов геометрической дискретизации области допустимого перемещения;
- разработка алгоритма фильтрации точек с учётом технических и геометрических ограничений;
- создание модели оценки зон видимости на основе трассировки лучей и кольцевого распределения контрольных точек;
- формулировка задачи оптимизации выбора точек базирования в виде задачи покрытия и разработка алгоритма её решения;
- экспериментальная проверка разработанных методов на 3-D модели подстанции.

3D-модель подстанции для проверки методов

Для верификации предложенных математических методов использовалась цифровая 3D-модель подстанции высокого напряжения, реализованная в среде Unity с применением встроенной системы физико-математического моделирования движения объектов.

Модель включает основные элементы открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции: трансформаторы, выключатели, разъединители, порталные конструкции и изоляторы. Объекты заданы упрощёнными геометрическими примитивами (параллелепипеды, цилиндры), что позволило сохранить пропорции и масштаб оборудования при значительном снижении вычислительной нагрузки.

В рамках 3D-модели реализованы:

- задание областей перемещения наземного РТК и выделение дорожного пространства;
- формирование зон запрета, соответствующих недоступным или опасным для движения участкам (фундаменты, опоры, кабельные каналы);

- моделирование диагностируемых объектов в виде трёхмерных коллайдеров для анализа зон видимости.

Использование Unity позволило проводить сценарные испытания в условиях, приближённых к реальным, и визуализировать результаты работы алгоритмов. Такой подход обеспечил воспроизводимую проверку дискретизации, фильтрации и оптимизации множества точек базирования, а также дал возможность формировать маршруты в формате, пригодном для последующей интеграции в цифровые двойники энергетических объектов.

Постановка задачи и общая схема обработки данных

Объектом исследования является процесс планирования маршрута обследования ОРУ подстанции высокого класса напряжения с использованием мобильного наземного РТК, оснащённого средствами визуального и мультиспектрального контроля (камера видимого спектра, инфракрасная камера, ультрафиолетовая камера).

В качестве исходных данных используются:

- пространственная модель обследуемой зоны, заданная в виде замкнутой многоугольной области;
- набор целевых объектов диагностики (изоляционные элементы, выключатели, трансформаторы тока и напряжения, разъединители и др.), описанных геометрическими примитивами или ограничивающими объёмами;
- технические характеристики РТК, включая габариты, допустимые углы обзора, дальность сенсоров, минимальные и максимальные дистанции до объекта, а также зоны, запрещённые для перемещения.

Задача заключается в определении множества точек базирования — позиций РТК, из которых возможен сбор диагностически значимых данных целевых объектов. При этом необходимо обеспечить: полный охват заданного множества объектов; соблюдение технических ограничений РТК

(зоны запрета, углы обзора, радиус поворота); минимизацию числа выбранных точек либо суммарной длины маршрута между ними.

Метод

Предлагаемый метод построения множества точек базирования для маршрута обследования включает четыре основных этапа, каждый из которых реализуется определенным алгоритмом.

1. Геометрическая дискретизация области допустимого движения.

Исходная область перемещения Ω , заданная в виде многоугольной области в 2D-пространстве, покрывается регулярной решёткой с шагом h по обоим пространственным осям. На решётке формируется множество кандидатов G , включающее все точки, попадающие внутрь допустимой зоны. Для проверки принадлежности точки многоугольнику используется алгоритм выбрасывания луча (ray casting) [11], обеспечивающий корректность выделения внутренних областей. Алгоритм основан на проведении из точки луча с последующим определением ближайшего пересечения с границей зоны. На рисунке 1 приведён пример геометрической дискретизации допустимой области движения РТК, полученной на этапе формирования множества кандидатов.

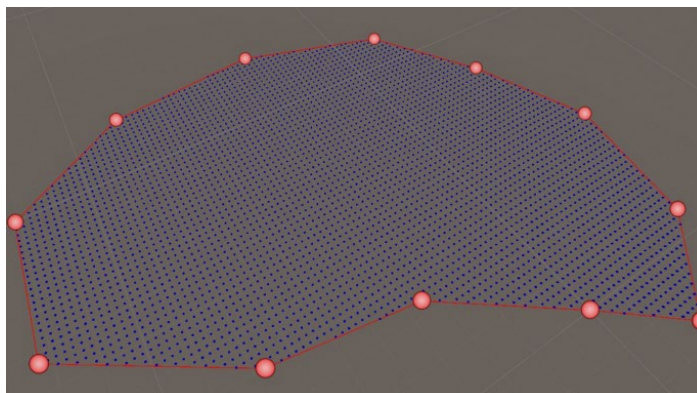


Рис. 1. – Пример геометрической дискретизации допустимой области движения РТК

2. Фильтрация точек с учётом технических ограничений. Из множества G исключаются позиции, не удовлетворяющие ограничениям. Фильтрация учитывает:

- зоны запрета для движения;
- допустимые углы обзора диагностических сенсоров;
- пересечение с моделями объектов;
- условия устойчивости навигационного сигнала.

В результате формируется подмножество допустимых точек $B_0 \subseteq G$. На рисунке 2 показан результат фильтрации множества дискретных точек с учётом технических ограничений и зон запрета.

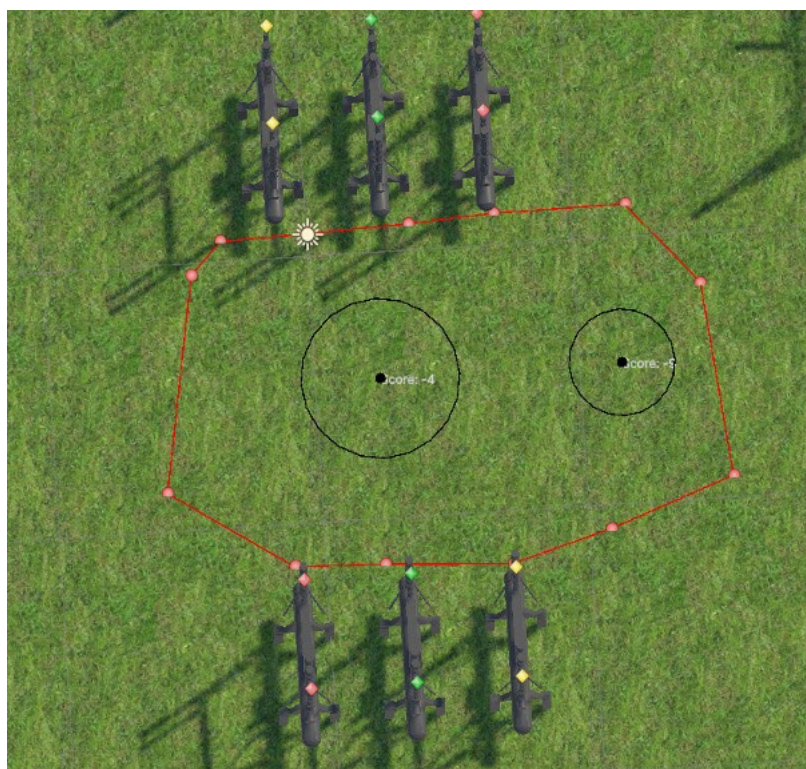


Рис. 2. – Фильтрация множества дискретных точек с учетом технических ограничений и зон запрета

3. Моделирование зон видимости. Для каждой точки маршрута ($b_i \in B$) выполняется анализ видимости целевых объектов $o_j \in O$. Проверка осуществляется трассировкой лучей [12] до контрольных точек объектов. Алгоритм пересечения луча и ограничивающим прямоугольником (Ray-AABB) выполняет проверку пересечения луча с прямоугольником выровненной по осям координат; алгоритм вычислительно эффективно определяет, пересекает ли луч прямоугольник, и вычисляет точку и расстояние пересечения. Алгоритм пересечения луча с ориентированным ограничивающим прямоугольником (Ray-OBV) отличается поворотом прямоугольника в произвольном направлении; алгоритм сначала преобразует луч в локальную систему координат, а затем применяет алгоритм Ray-AABB.

Для повышения точности используется кольцевая схема: вокруг оси наблюдения формируется множество контрольных точек, что позволяет выявлять частичное перекрытие объектов. Качество видимости определяется процентом незаслонённых точек. Объект считается охваченным, если видимы не менее 70 % контрольных точек. На рисунке 3 представлен предложенный алгоритм оценки качества видимости на основе кольцевого распределения контрольных точек.

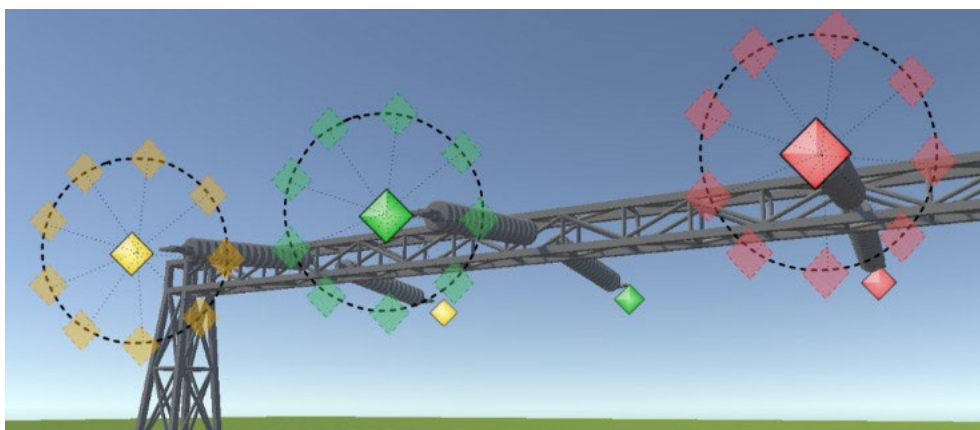


Рис. 3. – Предложенная методика с кольцевым распределением контрольных точек

4. Оптимизация множества точек. Постановка задачи оптимизации формулируется как задача покрытия: необходимо найти минимальное множество точек B , для которого выполняется условие охвата всех объектов диагностики:

$$|B| \rightarrow \min, O \subseteq \bigcup_{b \in B} V(b), B \subseteq B_0, \quad (1)$$

где $V(b)$ — множество объектов, диагностируемых из точки b , B_0 — подмножество доступных точек (после фильтрации на шаге 2).

Решение выполняется жадным алгоритмом: на каждом шаге выбирается точка, покрывающая максимум ещё не охваченных объектов. При необходимости используется дополнительный критерий — минимизация длины маршрута.

Результаты

Для проверки корректности и эффективности предложенного метода проведены численные эксперименты на цифровом двойнике подстанции высокого напряжения. В 3D-модели воспроизводились реальные условия компоновки оборудования, включая трансформаторы, выключатели, изоляторы, порталы и пр.

Сценарий 1. Линейный сегмент. В качестве тестовой области выбрана половина главной дороги ОРУ (рисунок 4). В зону диагностики включены 27 объектов (в основном порталные изоляторы). На первом этапе дискретизации с шагом 0,5 м сформировано 418 потенциальных точек базирования. Фильтрация с учётом зон запрета и углов обзора исключила более 70 % кандидатов, оставив 112 допустимых точек. Оптимизация множества дала 10 базовых позиций. Проверка полноты охвата подтвердила 100 % доступность объектов. Среднее количество объектов, просматриваемых из одной точки, составило 2,45. Длина маршрута после

оптимизации составила 94 м, что сопоставимо с длиной исследуемого сегмента.

Сценарий 2. Плотная зона с перекрытиями. Вторая серия испытаний выполнялась для полной главной дороги ОРУ, включающей 33 объекта различных типов (рисунок 5): разъединители, трансформаторы тока и напряжения, конденсаторы связи, изоляторы. Дискретизация области движения дала 528 потенциальных точек. После фильтрации осталось 138 допустимых позиций. Итоговое множество включило 14 базовых точек. Полнота охвата составила 96,9 %, что объясняется взаимным перекрытием оборудования и ограничением углов наблюдения. Среднее число объектов, доступных из одной позиции, выросло до 2,6. Общая длина маршрута составила 112 м.

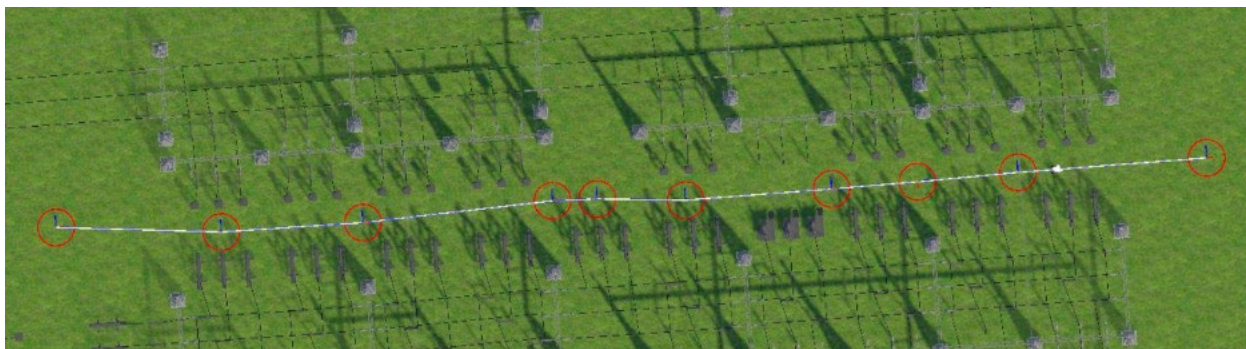


Рис. 4. – Сформированный маршрут для первого сценария с указанием базовых точек

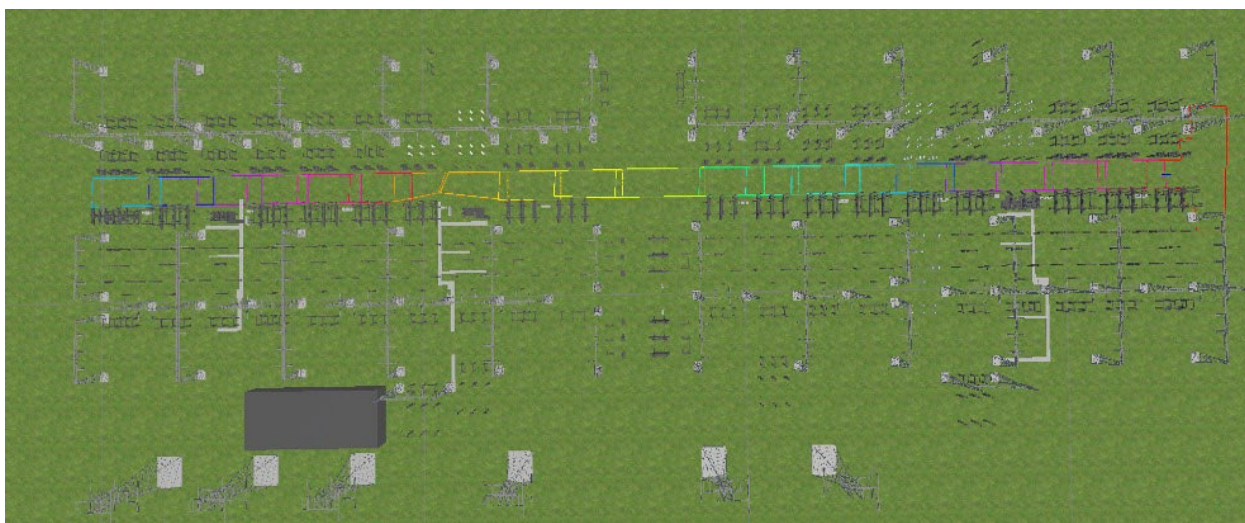


Рис. 5. – Тестовый участок подстанции для второго сценария

Сравнительные показатели приведены в таблице №1. Также в ходе экспериментов установлено, что применение кольцевой схемы оценки зон видимости позволило выявить случаи частичного перекрытия объектов. В частности, в сценарии 2 часть трансформаторов оказывалась заслонена элементами портала, что традиционные методы с одной контрольной точкой не учитывают. Предложенный метод корректно отработал такие ситуации, снижая вероятность включения в маршрут точек, сбор данных в которых даст результат с низкой информативностью из-за перекрытий.

Таблица № 1

Сравнительный анализ показателей по маршрутам

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2
Объектов диагностики	27	33
Точек после дискретизации	418	528
После фильтрации	112	138
Итоговое множество точек	10	14
Средний охват одной точки	2,45	2,60
Полнота охвата	100,0 %	96,9 %
Длина маршрута	94 м	112 м

Дополнительно исследовалось влияние шага дискретизации. При его увеличении до 1 м общее количество точек сокращалось почти вдвое, однако полнота охвата снижалась до 90–92 %. Это подтверждает важность выбора оптимального шага, позволяющего балансировать между скоростью выполнения сбора данных с помощью РТК и полнотой диагностики.

В обоих сценариях разработанный метод позволил уменьшить количество базовых точек более чем в четыре раза по сравнению с исходным множеством, сохраняя высокий уровень охвата. Полученные маршруты экспортировались в формате CSV и могут напрямую использоваться в программном обеспечении РТК. Таким образом, предложенный подход обеспечивает воспроизводимое построение маршрутов и может быть интегрирован в интеллектуальные подсистемы технического контроля энергетических объектов.

Заключение

В статье рассмотрена задача дискретизации пространства допустимого перемещения и оптимизации множества точек базирования для наземных робототехнических комплексов, выполняющих диагностику оборудования энергетических объектов.

Предложен формализованный метод, включающий четыре ключевых этапа: геометрическую дискретизацию рабочей области с использованием регулярной сетки; фильтрацию множества точек с учётом технических ограничений робототехнической платформы и зон запрета; моделирование зон видимости с применением трассировки лучей и кольцевой схемы распределения контрольных точек; оптимизацию подмножества базовых позиций в постановке задачи покрытия. Такой подход позволил перейти от эвристических решений к строгой математической модели.

Экспериментальная проверка на 3D-модели подстанции показала, что применение предложенного метода обеспечивает сокращение числа базовых

точек более чем в четыре раза по сравнению с исходным множеством после дискретизации, при этом полнота охвата диагностируемых объектов составляет 96,9–100 %. Дополнительно показано, что использование кольцевой схемы оценки зон видимости позволяет корректно выявлять случаи частичного перекрытия оборудования и снижает вероятность ошибок при планировании маршрута.

Одним из направлений дальнейших исследований является переход к многокритериальной задаче оптимизации, позволяющей определять компромиссное решение между количеством точек маршрута, полнотой получаемых данных, а также учитывающая техническое состояние самого РТК.

Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции результатов в системы автоматизированной подготовки миссий для РТК с высокой воспроизводимостью построения маршрутов для их применения в составе цифровых двойников электроэнергетических объектов.

Таким образом, предложенный метод и реализующие его алгоритмы дискретизации и оптимизации точек базирования обеспечивают формальное, воспроизводимое и эффективное решение задачи планирования маршрутов наземных РТК для диагностики электроэнергетических объектов.

Литература

1. Хальясмаа А.И. Метод автоматического анализа тепловизионных изображений высоковольтного оборудования с помощью алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения без учителя // Инженерный вестник Дона. 2025. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9865.
2. Romanov A.M., Eroshenko S.A., Gyrichidi N. MAD Robot: Concept and Prototype Description of the Robot for Multi-Spectral Power Equipment Diagnostics. Part I, II // 2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC). 2023. pp. 136–149.

3. Gyrichidi N., Romanov A. M., Trofimov O. V. [et al.] GNSS-based narrow narrow-angle UV camera targeting: case study of a low-cost mad robot // Sensors. 2024. Vol. 24 (11). P. 3494.
4. Lu S., Zhang Y., Su J. Mobile robot for power substation inspection: A survey // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2017. Vol. 4. pp. 830–847.
5. Zhang T., Dai J. Electric power intelligent inspection robot: A review // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1750. P. 012023.
6. Dandurand P., Beaudry J., Hebert C. [et al]. All-weather autonomous inspection robot for electrical substations // 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). 2022. pp. 303–308.
7. Zhao W., Cui A., Fang M. [et al]. State assessment of 110–220 kV intelligent substation based on multisensor fusion algorithm control and image vision // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 10. P. 1047359.
8. Хальясмаа А. И. Машинное обучение как инструмент повышения эффективности управления жизненным циклом высоковольтного электрооборудования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 5(154). С. 1093–1104.
9. Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. [et al]. Data Mining Applied to Decision Support Systems for Power Transformers Health Diagnostics// Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 2486.
10. Braun J., Brito T., Lima J. [et al]. A Comparison of A* and RRT* Algorithms with Dynamic and Real Time Constraint Scenarios for Mobile Robots // 9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. 2019. pp. 398–405.
11. Roth S. D. Ray casting for modeling solids // Computer Graphics and Image Processing. 1982. Vol. 18. No. 2. pp.109–144.

12. Sabino R., Vidal C., Cavalcante-Neto J., Maia, J. Fast and Robust Ray/OBB Intersection Using the Lorentz Transformation // Ray Tracing Gems II. 2019. pp. 519–528.

References

1. Khalyasmaa A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9865.
2. Romanov A.M., Eroshenko S.A., Gyrichidi N. MAD Robot: Concept and Prototype Description of the Robot for Multi-Spectral Power Equipment Diagnostics. Part I, II. 2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC). 2023. pp. 136–149.
3. Gyrichidi N., Romanov A. M., Trofimov O. V. [et al.] GNSS-based narrow narrow-angle UV camera targeting: case study of a low-cost mad robot. Sensors. 2024. Vol. 24 (11). P. 3494.
4. Lu S., Zhang Y., Su J. Mobile robot for power substation inspection: A survey. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2017. Vol. 4. pp. 830–847.
5. Zhang T., Dai J. Electric power intelligent inspection robot: A review. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1750. P. 012023.
6. Dandurand P., Beaudry J., Hebert C. [et al]. All-weather autonomous inspection robot for electrical substations. 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). 2022. pp. 303–308.
7. Zhao W., Cui A., Fang M. [et al]. State assessment of 110–220 kV intelligent substation based on multisensor fusion algorithm control and image vision. Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 10. P. 1047359.
8. Khalyasmaa A.I. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. T. 24, № 5(154). pp. 1093–1104.
9. Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. [et al]. Data Mining Applied to Decision Support Systems for Power Transformers Health Diagnostics. Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 2486.



10. Braun J., Brito T., Lima J. [et al]. A Comparison of A* and RRT* Algorithms with Dynamic and Real Time Constraint Scenarios for Mobile Robots. 9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. 2019. pp. 398–405.

11. Roth S. D. Ray casting for modeling solids. Computer Graphics and Image Processing. 1982. Vol. 18. No. 2. pp.109–144.

12. Sabino R., Vidal C., Cavalcante-Neto J., Maia, J. Fast and Robust Ray/OBB Intersection Using the Lorentz Transformation. Ray Tracing Gems II. 2019. pp. 519–528.

Дата поступления: 19.08.2025

Дата публикации: 30.09.2025