

УДК 658.562

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-90-99

## Метод построения маршрута движения наземного робототехнического комплекса для задач технической диагностики подстанционного оборудования

Я. В. Бренчук, студент, Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

С. А. Ерошенко, кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

И. В. Матвеев, Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*В работе рассматривается метод построения и верификации маршрутов движения наземных робототехнических комплексов, предназначенных для автоматизированной диагностики высоковольтного оборудования подстанций. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения безопасности и эффективности технического обслуживания в условиях высокого уровня износа энергетической инфраструктуры и роста требований к предиктивному контролю. Предлагаемая система маршрутизации интегрируется в 3D-модель подстанции и опирается на совокупность геометрических, алгоритмических и кинематических методов, обеспечивающих построение оптимальной траектории движения с гарантированным охватом диагностируемых объектов. Алгоритм включает последовательные этапы сегментации территории, дискретизации дорожного пространства, фильтрации точек базирования по эксплуатационным ограничениям, анализа зон видимости на основе методов трассировки лучей и ориентированных ограничивающих объемов, а также оптимизации последовательности обследования с учетом кинематических характеристик мобильной платформы. Управление движением реализовано посредством ПИД-регулирования, обеспечивающего устойчивое следование по траектории в условиях ограниченной маневренности и сложной пространственной структуры подстанции. Работоспособность метода подтверждена имитационным моделированием в среде Unity на 3D-модели подстанции 220 кВ. Проведенные испытания продемонстрировали полное покрытие целевых объектов и устойчивое движение по маршруту. Полученные результаты подтверждают применимость разработанного решения для задач автоматизации диагностики на энергетических объектах и его потенциал для интеграции в цифровые двойники подстанций.*

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, диагностика оборудования, маршрут обследования, точка базирования, 3D-модель, Unity, открытое распределительное устройство.

### Введение

Высокий уровень физического износа оборудования распределительных устройств в электроэнергетике России делает задачи диагностики и контроля технического состояния оборудования критически важными. Традиционные подходы, основанные на визуально-инструментальном контроле, характеризуются высокой трудоемкостью, рисками для обслуживающего персонала и ограниченной воспроизводимостью результатов. В этих условиях растет потребность в автоматизированных решениях, обеспечивающих предиктивную диагностику без прямого участия человека. Совершенствование систем мониторинга, методов диагностики и диагностических моделей создает возможности перехода к системе ремонтов по техническому состоянию оборудования [1, 2].

Одним из перспективных направлений является внедрение наземных робототехнических комплексов (РТК), способных автономно перемещаться по территории объектов электроэнер-

гетики и выполнять диагностику оборудования с использованием встроенных сенсоров и камер [3, 4]. В работах [5, 6] приведены детальные обзоры особенностей и перспектив использования диагностических РТК на объектах электроэнергетики. Также в работах [4, 7, 8] отмечаются новые возможности по диагностике электрооборудования с помощью РТК, связанные с расширением количества одновременно используемых методов контроля, в частности на основе сбора и обработки мультиспектральных данных. Эффективность их применения напрямую зависит от качества построения маршрутов движения РТК [9–11]. Необходимо учитывать не только геометрию объекта и наличие препятствий, но и технические ограничения комплекса, параметры зоны видимости и характеристики диагностируемого оборудования [12].

Целью настоящей работы является разработка архитектуры системы построения маршрутов для РТК, интегрированной в 3D-модель станции, с возможностью автоматической генерации

оптимального маршрута обследования оборудования. Представлены принципы сегментации территории, фильтрации точек базирования, расчета зон видимости и построения маршрута с учетом кинематических ограничений. Результаты подтверждаются имитационным моделированием в среде Unity [13].

Научная новизна работы заключается в разработке метода формирования диагностических маршрутов наземных робототехнических комплексов для обследования оборудования подстанций на основе интеграции геометрического анализа пространства, оценки зон видимости и учета кинематических ограничений мобильной платформы.

В отличие от существующих подходов планирования траекторий мобильных роботов, ориентированных преимущественно на минимизацию длины пути, предложенный метод ориентирован на решение задачи диагностического покрытия оборудования энергетических объектов.

Основные элементы научной новизны заключаются в следующем:

1. Разработан метод формирования маршрута РТК, учитывающий одновременно геометрию энергообъекта, зоны видимости диагностируемого оборудования и технические ограничения мобильной платформы.

2. Предложен алгоритм оценки диагностической доступности объектов на основе анализа зон видимости с использованием методов трассировки лучей и упрощенных коллаидеров оборудования.

3. Разработана процедура оптимизации точек базирования робототехнического комплекса, обеспечивающая максимальный охват диагностируемых объектов при минимальном числе остановок робота.

#### Постановка задачи

Объектом исследования является процесс формирования траектории движения наземного робототехнического комплекса, предназначенного для автоматизированной диагностики оборудования электрических подстанций. Основной задачей является построение маршрута движения РТК, обеспечивающего полный охват диагностируемых объектов при минимальной длине пути и с учетом ограничений, обусловленных конструкцией мобильной платформы и пространственной структурой энергообъекта.

Формирование маршрута рассматривается как совокупность следующих этапов:

- сегментация территории подстанции, определяющая рабочие зоны перемещения с воз-

можностью ручной или автоматической разметки;

- дискретизация дорожного пространства, обеспечивающая генерацию набора потенциальных точек базирования РТК;

- фильтрация точек, исключая области с ограничениями (зоны плохого сигнала, запретные зоны, недопустимые углы обзора);

- анализ зон видимости, позволяющий определить эффективные позиции для диагностики объектов с учетом их геометрии;

- построение маршрута, основанное на принципах комбинаторной оптимизации и оценке охвата целевых точек;

- формирование управляющего файла, содержащего координаты маршрута и параметры диагностики, пригодного для загрузки в систему управления РТК.

В обзорах по навигации РТК ключевыми критериями оптимизации пути указываются минимальная длина траектории, время движения и энергозатраты, при этом подчеркивается необходимость решения задачи как многокритериальной [14–16]. Таким образом, выбор функционала оптимизации определяется спецификой задачи. В данной работе основным критерием является обеспечение полного диагностического покрытия оборудования при одновременном сокращении длины маршрута и числа точек базирования. Моделирование энергозатрат в рамках настоящей работы не рассматривается, поскольку исследование сосредоточено на критериях покрытия объектов, числа точек базирования и длины маршрута.

Формально пространство перемещения робототехнического комплекса представляется в виде графа допустимых перемещений

$$G = (P, E),$$

где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – множество допустимых точек базирования робототехнического комплекса (заданные координатами  $x, y$ );  $E \subset P \times P$  – множество допустимых переходов между точками перемещения.

Каждая точка базирования  $v_i$  характеризуется множеством диагностируемых объектов, которые могут быть наблюдаемы из данной позиции:

$$Vis(p_i) \subseteq T,$$

где  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  – множество целевых объектов диагностики.

Задача планирования маршрута заключается в определении последовательности точек перемещения:

$$R = \{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_k}\},$$

которая обеспечивает полный диагностический охват объектов

$$\bigcup_{p_i \in R} Vis(p_i) = T,$$

при минимизации функционала оптимальности:

$$J(R) = \alpha L(R) + \beta N(R),$$

где  $L(R)$  – длина маршрута движения робототехнического комплекса;  $N(R)$  – число остановок (точек базирования);  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты задают относительную значимость длины маршрута и числа точек базирования. В рамках данной работы функционал используется для формального представления критериев оптимальности в общем виде. В данной работе на практике задача решается в последовательной постановке: сначала обеспечивается полное покрытие диагностируемых объектов, затем сокращается число точек базирования, и далее минимизируется длина маршрута.

Длина маршрута определяется как

$$L(R) = \sum_{i=1}^{k-1} d(p_i, p_{i+1}),$$

где  $d$  – расстояние между соседними точками маршрута.

При формировании маршрута дополнительно учитываются ограничения мобильной платформы, включая минимальный радиус поворота, максимальную допустимую скорость движения и ограничения на ориентацию диагностического оборудования относительно объекта наблюдения.

Таким образом, задача построения маршрута робототехнического комплекса формулируется как задача оптимизации маршрута в графе навигационного пространства с учетом геометрических, кинематических и диагностических ограничений.

Для решения данной задачи предлагается алгоритм, включающий этапы сегментации территории подстанции, дискретизации пространства перемещения, анализа зон видимости диагностируемых объектов и оптимизации последовательности посещения точек базирования.

#### Метод построения маршрута

Алгоритм построения маршрута робототехнического комплекса реализован в фреймворке Unity с использованием среды физического моделирования NVIDIA PhysX и включает последовательное решение нескольких взаимосвязанных подзадач, направленных на формирование оптимального маршрута обследования оборудования подстанции. Ниже описаны этапы метода.

1. Сегментация территории. На первом этапе производится разбиение территории подстанции на сегменты, представляющие допустимые области перемещения РТК. Сегментация выполняется на основе геометрической модели объекта и учитывает расположение оборудования, дорожную инфраструктуру и зоны с ограниченным доступом.

Формально территория подстанции представляется в виде множества областей

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\},$$

где  $S_i$  – отдельный сегмент, в пределах которого допускается перемещение РТК.

Каждый сегмент характеризуется набором допустимых координат:

$$S_i = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid$$

$(x, y)$  принадлежит области перемещения}

Сегментация может выполняться вручную оператором или автоматически на основе анализа геометрии 3D-модели подстанции.

2. Дискретизация пространства перемещения. После сегментации выполняется дискретизация допустимых областей перемещения РТК. Для каждого сегмента формируется регулярная сетка потенциальных точек базирования РТК.

Шаг дискретизации определяется параметром сетки  $h$ , который выбирается исходя из размеров РТК и требуемой точности планирования маршрута.

Для проверки принадлежности точки допустимой области используется алгоритм Ray Casting [17], позволяющий определить, находится ли точка внутри допустимого сегмента пространства. Метод RayCasting выбран в связи с его универсальностью и вычислительной эффективностью при решении задач определения принадлежности точки области и проверки прямой видимости в трехмерных сценах.

3. Фильтрация точек базирования. На следующем этапе производится фильтрация точек базирования с целью исключения позиций, не удовлетворяющих эксплуатационным ограничениям.

Из множества  $P$  удаляются точки, которые находятся в запретных зонах, или не обеспечивают допустимые углы наблюдения диагностического оборудования; или расположены слишком близко к препятствиям или оборудованию.

Формально после фильтрации формируется подмножество допустимых точек  $P' \subseteq P$ , где каждая точка  $p_i \in P'$  удовлетворяет ограничениям:

$$g_j(p_i) \leq 0, \quad j = 1, 2,$$

$$g_1(p_i) = |\psi_i| - \psi_{\max}, \quad g_2(p_i) = |\theta_i| - \theta_{\max},$$

где  $g_j$  – функции ограничений, определяющие допустимость положения точки.

4. Анализ зон видимости. Для каждой допустимой точки базирования проводится анализ зон видимости диагностируемых объектов:  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ . Для каждой точки  $p_i$  определяется множество объектов, доступных для наблюдения:

$$Vis(p_i) = \{t_j \in O \mid LOS(p_i, o_j) = 1\},$$

где  $LOS(p_i, o_j)$  – функция наличия прямой видимости между точкой базирования и объектом, возвращающая значения 0 или 1.

Проверка видимости выполняется методом трассировки лучей (Ray Casting). Для повышения вычислительной эффективности объекты оборудования представляются ориентированными ограничивающими параллелепипедами, использование которых позволяет существенно снизить вычислительную сложность задачи за счет упрощения геометрии объектов при сохранении достаточной точности оценки видимости.

5. Оптимизация маршрута. После определения зон видимости формируется маршрут посещения точек базирования. Задача оптимизации заключается в выборе последовательности точек

$$R = \{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_k}\},$$

обеспечивающей полный диагностический охват объектов  $O$  при минимизации функционала  $J(R)$ .

На этапе 5.1 выполняется выбор точек базирования, обеспечивающих покрытие множества диагностируемых объектов. Для этого используется жадный алгоритм покрытия:

$$p^* = \arg \max_{p_i \in P} |Vis(p_i) \setminus Vis(R)|,$$

где  $Vis(R)$  – множество объектов, уже покрытых ранее выбранными точками базирования, так что на каждой итерации выбирается точка базирования  $p_i$ , обеспечивающая максимальный прирост количества ранее не охваченных объектов диагностики. Такой подход позволяет сформировать множество точек базирования, обеспечивающее полное покрытие множества  $O$  при сокращении общего числа остановок, что соответствует уменьшению компоненты  $N(R)$  критерия оптимальности.

На этапе 5.2 выполняется упорядочивание выбранных точек базирования по критерию минимизации суммарной длины маршрута (компонента  $L(R)$  критерия оптимальности). Для этого формируется матрица расстояний между точками и применяется жадный алгоритм ближайшего соседа, в рамках которого на каждом

шаге из текущей точки выбирается ближайшая из еще не посещенных:

$$p_{i+1} = \arg \min_{p_j \in P \setminus R} d(p_i, p_j).$$

В данной работе выбран жадный алгоритм покрытия, поскольку задача диагностики требует обеспечения полного охвата множества объектов при ограниченном числе точек базирования, а точные методы имеют высокую вычислительную сложность при большом числе объектов. Для упорядочивания выбранных точек базирования используется жадный алгоритм ближайшего соседа, обеспечивающий приемлемое приближенное решение задачи минимизации длины маршрута при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с точными методами.

6. Учет кинематических ограничений РТК. Финальная траектория движения корректируется с учетом кинематических ограничений мобильной платформы. Для платформ с дифференциальным приводом допускается разворот на месте, что упрощает формирование маршрута. Для платформ с управляемыми колесами вводится ограничение минимального радиуса поворота.

На основе этого ограничения прямолинейные сегменты маршрута заменяются на дуговые траектории, обеспечивающие физически реализуемое движение РТК.

Необходимо отметить, что ограничения мобильной платформы учитываются на нескольких этапах алгоритма. На этапе фильтрации исключаются точки базирования, не удовлетворяющие условиям видимости и ограничениям по ориентации диагностического оборудования:

$$|\psi| \leq \psi_{\max}, \quad |\theta| \leq \theta_{\max}.$$

На этапе построения маршрута учитывается минимальный радиус поворота платформы при проверке допустимости переходов между соседними точками:

$$r_{\text{turn}} \geq r_{\min}.$$

На этапе формирования траектории ломаная линия маршрута преобразуется в кусочно-гладкую с учетом данного ограничения. Ограничение по максимальной скорости учитывается при имитационном моделировании:

$$v \leq V_{\max}.$$

В результате формируется гладкая траектория движения, удовлетворяющая геометрическим и кинематическим ограничениям робототехнического комплекса. На рис. 1 изображен пример работы данного этапа алгоритма: окружности меньшего радиуса – путевые точки, через которые движется РТК; окружности

большого радиуса – точки остановки (диагностики), где выполняются измерения; пунктирная линия – оптимальная траектория движения, построенная с учетом радиуса поворота и кинематики.



Рис. 1. Финальная траектория движения робототехнического комплекса с учетом ограничений по радиусу поворота

Fig. 1. The final trajectory of the robotic complex, taking into account the restrictions on the turning radius

### Кинематическая модель РТК и управление его движением

Для обеспечения устойчивого движения РТК по сформированной траектории используется модель управления движением, учитывающая кинематические характеристики платформы и отклонение от заданного маршрута.

В рамках данной работы используется кинематическая модель движения РТК, что обусловлено задачей планирования траектории и анализа маршрутов. Детальное моделирование динамики РТК и синтез системы управления с учетом инерционных свойств выходят за рамки настоящего исследования и могут быть предметом дальнейших работ.

Движение РТК описывается кинематической моделью плоского движения:

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega,$$

где  $x, y$  – координаты центра РТК;  $v$  – линейная скорость движения (м/с);  $\theta$  – угол ориентации платформы (рад);  $\omega$  – угловая скорость вращения (рад/с).

В качестве управляющих воздействий в кинематической модели выступают линейная скорость  $v(t)$  и угловая скорость  $\omega(t)$  РТК. В рассматриваемой постановке линейная скорость задается как опорная величина  $v_0$ , определяемая режимом движения и ограничениями платформы, тогда как угловая скорость  $\omega(t)$  формируется ПИД-регулятором на основе сглаженной ошибки отклонения от траектории. ПИД-регулятор выбран как классический метод управления движением мобильных робототехнических систем, обеспечивающий устойчивое следование по заданной траектории при наличии возмущений и ошибок измерения.

Отклонение РТК от заданной траектории определяется как расстояние до ближайшего сегмента маршрута:

$$e(t) = d(B(t), R),$$

где  $e(t)$  – поперечная ошибка отклонения РТК от заданной траектории ( $m$ );  $B(t)$  – текущая позиция робота;  $R$  – заданная траектория движения.

Для уменьшения влияния шумов измерения ошибки применялся цифровой фильтр сглаживания:

$$e_f(t) = \lambda e_f(t-1) + (1-\lambda)e(t),$$

где  $e_f(t)$  – сглаженная ошибка;  $\lambda$  – коэффициент фильтрации (в работе использовалось значение  $\lambda = 0,8$ ).

Управляющий сигнал определяется выражением:

$$u(t) = K_p e_f(t) + K_i \int_0^t e_f(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

$$\omega(t) = u(t),$$

$$v(t) = v_0, \quad 0 < v_0 \leq V_{\max},$$

где  $K_p, K_i, K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно;  $u(t)$  – управляющее воздействие, интерпретируемое как команда на изменение угловой скорости РТК;  $\omega(t)$  – угловая скорость поворота РТК, определяющая изменение его ориентации при следовании по траектории;  $v_0$  – заданная линейная скорость движения.

Пропорциональная составляющая обеспечивает коррекцию текущего отклонения, интегральная устраняет накопленную систематическую ошибку, а дифференциальная снижает колебания системы управления.

Выбор коэффициентов ПИД-регулятора осуществлялся эмпирически в процессе имитационного моделирования с целью обеспечения устойчивого следования по траектории без колебаний и перерегулирования. Подобранные следующие значения ПИД-регулятора:  $K_p = 1,5$ ;  $K_i = 0,05$ ;  $K_d = 0,2$ .

Использование фильтра обусловлено необходимостью подавления шумов измерения ошибки, возникающих при моделировании движения в сложной среде.

Отклонения движения, обусловленные рельефом и неоднородностью поверхности, проявляются через сигнал ошибки  $e(t)$ , на основе которого формируется управляющее воздействие. Применение классических методов настройки ПИД-регулятора (например, метода Циглера – Николса) не использовалось, поскольку в рамках работы отсутствует явная динамическая модель объекта управления, необходимая для их корректного применения.

Сформированный алгоритмом маршрут представляет собой последовательность путевых точек, которые далее аппроксимируются кусочно-гладкой траекторией движения.

### Имитационное моделирование

Для проверки корректности алгоритма построения маршрута и оценки его применимости в условиях реального энергетического объекта была разработана имитационная модель в среде Unity, реализующая 3D-модель подстанции 220 кВ (рис. 2). Алгоритм реализован с применением технологии NVIDIA PhysX и использует геометрические методы (Ray Casting, AABB-пересечения [17]) и регуляторы движения.

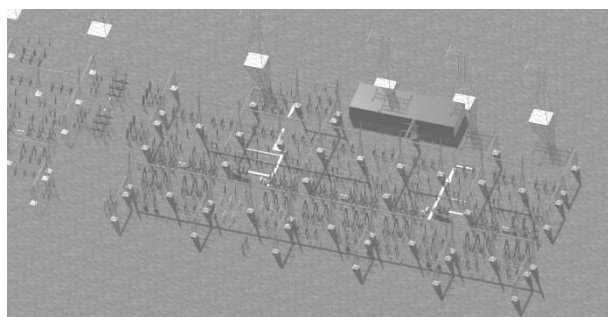


Рис. 2. 3D-модель подстанции 220 кВ

Fig. 2. 3D model of 220 kV substation

В модели воссоздано расположение основного оборудования: выключателей, трансформаторов тока и напряжения, разъединителей, порталов и линий электропередачи (ЛЭП). Пространственная структура объекта воспроизведена с использованием 3D-моделей в формате OBJ. Геометрическая точность обеспечена за счет использования реперных точек и двумерной схемы размещения оборудования. ЛЭП смоделированы с использованием кривых Безье и компонента LineRenderer (Unity), имитирующего провисание проводов.

### Модели робототехнических комплексов

В рамках моделирования реализованы два типа РТК:

- с дифференциальным приводом (разворот на месте, высокая маневренность);
- с поворотными колесами (повышенная устойчивость на скорости).

Каждая модель имеет заданные габаритные параметры, массу, радиус разворота и точку крепления диагностического оборудования. Физика движения реализована с использованием библиотеки NWN Vehicle Physics 2 [18].

### Управление движением

В систему встроен алгоритм автоматического следования по траектории. Для поддержания заданной скорости применяется ПИД-регулятор с цифровым фильтром ошибки.

### Рельеф и условия среды

В модель добавлены участки с различной поверхностью (грунт, бетон, рельеф с неровностями), сгенерированные средствами UnityTerrain и процедурным шумом Перлина [19]. Характеристики поверхности задавались как элементы сцены в среде моделирования и использовались для оценки устойчивости движения и величины отклонения от траектории. Разработанная имитационная среда обеспечивает воспроизводимую платформу для тестирования алгоритмов построения маршрута, контроля динамики движения и оценки полноты охвата объектов диагностики.

Для воспроизводимости экспериментов были заданы параметры робототехнической платформы, среды моделирования и диагностического оборудования. Основные параметры системы приведены в табл. 1.

Моделирование проводилось в условиях виртуальной 3D-модели подстанции, включающей основные типы оборудования: выключатели, трансформаторы тока и напряжения, разъединители, порталы и линии электропередачи. Геометрия объектов была представлена упрощенными коллайдерами, что позволило существенно снизить вычислительную нагрузку при анализе зон видимости.

Полученные параметры использовались при формировании маршрутов движения робототехнического комплекса и при проверке устойчивости движения в процессе имитационного моделирования.

Таблица 1. Параметры имитационного моделирования

Table 1. Parameters of the simulation

Параметр	Значение
Площадь моделируемой территории	320 × 180 м
Количество объектов диагностики	520
Тип робототехнической платформы	дифференциальный привод
Масса платформы	45 кг
Максимальная скорость движения	10 км/ч
Минимальный радиус поворота	1,2 м
Габариты РТК	1,3 x 1,0 м
Высота камер над уровнем земли	1,7 м
Шаг дискретизации пространства	0,1 м
Угол обзора диагностического модуля (рыскание)	±120°
Угол наклона диагностического модуля (тангаж)	45°

### Экспериментальные результаты

Работа алгоритма построения маршрута была проверена в условиях имитационного моделирования на основе 3D-модели подстанции. Проведены два испытания, различающиеся по площади охвата и количеству диагностируемых объектов.

**Испытание № 1.** В качестве тестовой зоны была выбрана первая половина главной дороги подстанции. В диагностическую зону включены порталные изоляторы. Использовался РТК с дифференциальным приводом и ограничениями по углам поворота диагностического модуля ( $\pm 120^\circ$  по рысканию,  $45^\circ$  по тангажу). Алгоритм сформировал маршрут с 12 точками базирования (рис. 3), охватывающими 100 % целевых точек. Проверка зон видимости показала отсутствие перекрытий.

Скорость движения комплекса варьировалась от 6 до 9 км/ч, отклонение от маршрута не превышало допустимых пределов. Линия на рис. 3 – это сформированная траектория движения РТК по главной дороге подстанции с учетом ограничений кинематики, зон видимости и требований диагностики.

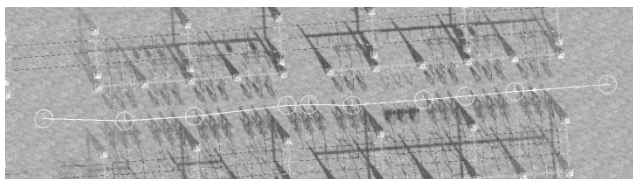


Рис. 3. Сформированный маршрут для первого испытания вид сверху с указанием точек останова

Fig. 3. The generated route for the first test is an overhead view with breakpoints

На рис. 4 показан результат испытания 1: РТК движется по рассчитанному маршруту внутри 3D-модели подстанции 220 кВ, что позволяет проверить корректность алгоритма и доступность точек диагностики.

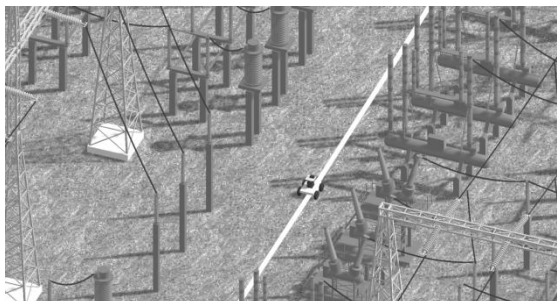


Рис. 4. Результат имитационной езды робота для первого испытания

Fig. 4. The result of a simulated robot ride for the first test

Рис. 5 демонстрирует проверку видимости диагностических объектов (изоляторов) из сформированных точек базирования: система определяет, какие элементы оборудования будут доступны для съемки и анализа с конкретной позиции РТК. Окружностями на рис. 5 выделены целевые точки диагностирования (изоляторы), которые РТК должен обследовать во время движения по маршруту.

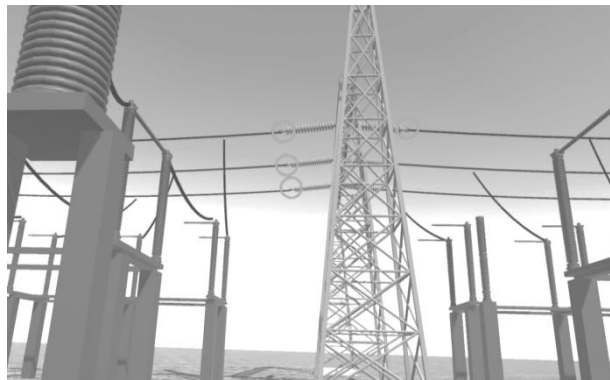


Рис. 5. Проверка точек диагностирования первого испытания

Fig. 5. Checking the diagnostic points of the first test

**Испытание № 2.** В рамках второго эксперимента использована вся главная технологическая дорога подстанции (рис. 6). Зона обследования включала все установленное оборудование (выключатели, трансформаторы, конденсаторы, разъединители и др.). В качестве РТК был выбран робот с дифференциальным приводом. Сформирован маршрут из 20 точек базирования, включающий 520 точек диагностики. Для обеспечения полного охвата применена стратегия с дополнительными опорными позициями. Алгоритм обеспечил полную диагностическую доступность объектов. Визуализация движения комплекса и проверки видимости показали стабильную работу управляющих алгоритмов.

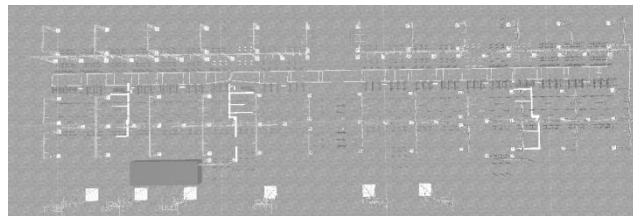


Рис. 6. Тестовый участок подстанции для второго испытания

Fig. 6. Test section of the substation for the second test

Таким образом, первое испытание на первой половине главной дороги подстанции подтвердило возможность формирования оптимальной траектории для робота с дифференциальным приводом. Имитационная езда по сформиро-

ванному маршруту показала, что все целевые точки для диагностирования, включая изоляторы на порталах, были видимы и доступны. Второе испытание на полном участке главной дороги подтвердило эффективность алгоритма при работе с большим количеством точек остановок и диагностирования, включая различные типы оборудования. Результаты обоих испытаний подтверждают адаптивность и эффективность разработанных алгоритмов, делая их пригодными для реальных условий эксплуатации на подстанциях.

### Заключение

Разработан и апробирован алгоритм формирования маршрутов для наземных робототехнических комплексов, предназначенных для диагностики оборудования высоковольтных подстанций. Архитектура решения включает сегментацию объекта, анализ зон видимости, фильтрацию точек базирования и оптимизацию последовательности обследования. Особое внимание уделено учету технических ограничений мобильной платформы и параметров диагностического оборудования.

Имитационные испытания на 3D-модели подстанции 220 кВ подтвердили работоспособность и универсальность алгоритма при различных сценариях. Полученные маршруты обеспечивают полное покрытие целевых точек, соответствуют кинематическим возможностям комплекса и могут быть использованы для автоматического планирования диагностических операций.

Реализация системы в среде Unity с физическим моделированием и ПИД-регулятором управления движением позволила создать воспроизводимую среду для верификации и доработки маршрутов. Подход может быть масштабирован для других типов энергообъектов и интегрирован в системы технического обслуживания.

Полученные результаты позволяют формировать маршруты обследования энергетических объектов в автоматическом режиме и могут быть использованы при разработке систем роботизированной диагностики оборудования подстанций.

Следует отметить ограничения и допущения, принятые в рамках данной работы. Рассматриваемая модель движения робототехнического комплекса является кинематической и не учитывает динамические эффекты, связанные с инерцией, силами взаимодействия с поверхностью и переходными процессами разгона и торможения. Учет динамики движения, разработка

методов формальной настройки регуляторов, а также применение более точных алгоритмов оптимизации маршрута представляют собой направления дальнейших исследований.

### Библиографические ссылки

1. Москвин К. В. Расследование причин аварий в электроэнергетике: оценка необходимости изменения и концепция развития нормативного регулирования // Правовой энергетический форум. 2023. № 1. С. 77–88. DOI 10.18254/S231243500025223-3.
2. 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. DOI <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1093-1104>.
3. 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). P. 136–149. DOI 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296467.
4. Хальясмаа А. И., Петрунько Н. Н. Альтернативный подход к диагностике внешней изоляции высоковольтного оборудования электрических станций и подстанций // Информатика и системы управления. 2024. № 4 (82). С. 72–82. DOI 10.22250/18142400\_2024\_82\_4\_72.
5. Lu S., Zhang Y., Su J. Mobile robot for power substation inspection: A survey. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2017. Vol. 4. P. 830–847. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510364.
6. Zhang T., Dai J. Electric power intelligent inspection robot: A review. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1750. Article 012023. DOI 10.1088/1742-6596/1750/1/012023.
7. 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. P. 303–308. DOI: 10.1109/SII52469.2022.9708835.
8. 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. Article 1047359. DOI 10.3389/fenrg.2022.1047359.
9. Qin X., Wu G., Lei J. [et al]. A Novel Method of Autonomous Inspection for Transmission Line based on Cable Inspection Robot LiDAR Data // Sensors. 2018. Vol. 18. Article. 596. DOI 10.3390/s18020596.
10. Zheng J., Chen T., He J. [et al.] Review on Security Range Perception Methods and Path-Planning Techniques for Substation Mobile Robots // Energies. 2024. Vol. 17(16). Article. 4106. DOI 10.3390/en17164106.
11. Luo S., Zhang M., Zhuang Y. A survey of path planning of industrial robots based on rapidly exploring random trees // Frontiers in Neurorobotics. 2023. Vol. 17. DOI 10.3389/fnbot.2023.1268447.

12. *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. 24 (11). Article 3494. DOI 10.3390/s24113494.

13. Unity Real-Time Development Platform. URL: <https://unity.com> (дата обращения 30.01.2026).

14. *Abdulsheh J., Kadhim, D.* Classical and Heuristic Approaches for Mobile Robot Path Planning: A Survey // *Robotics*. 2023. 12 (4). Article 93. DOI 10.3390/robotics12040093.

15. *Biundini L., Pinto M., Melo A. [et al.]*. A Framework for Coverage Path Planning Optimization Based on Point Cloud for Structural Inspection // *Sensors*. 2021., 21 (2). Article 570. DOI 10.3390/s21020570.

16. *Mansouri S., Kanellakis C., Fresk E. [et al.]*. Co-operative coverage path planning for visual inspection // *Control Engineering Practice*. 2021. 74. 118-131. DOI 10.1016/j.conengprac.2018.03.002.

17. *Williams A., Barrus J.* An Efficient and Robust Ray-Box Intersection Algorithm // *Journal of Graphics Tools*. 2005. Vol. 10, No. 1. DOI:10.1145/1198555.1198748.

18. NWH Vehicle Physics 2 Documentation. URL: <https://nwhvehiclephysics.com> (дата обращения 30.01.2026).

19. *Perlin K.* An Image Synthesizer // *SIGGRAPH*. 1985. P. 287–296. DOI 10.1145/325165.325247.

### References

1. *Moskvin K.V.* [Investigation of the causes of accidents in the electric power industry: assessment of the need for changes and the concept of regulatory development]. *Legal Energy Forum*. 2023. No. 1. Pp. 77-88 (in Russ.). DOI 10.18254/S231243500025223-3.

2. *Khalyasmaa A.I.* [Machine learning as a tool for improving the efficiency of life cycle management of high-voltage electrical equipment]. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2020. Vol. 24, no. 5. Pp. 1093-1104 (in Russ.). DOI <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1093-1104>.

3. *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)*. P. 136–149. DOI 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296467.

4. *Khalyasmaa A.I., Petrunko N.N.* [An alternative approach to the diagnosis of external insulation of high-voltage equipment of electric power plants and substations]. *Informatics and control systems*. 2024. No. 4. Pp. 72-82 (in Russ.). DOI 10.22250/18142400\_2024\_82\_4\_72.

5. *Lu S., Zhang Y., Su J.* Mobile robot for power substation inspection: A survey. *IEEE/CAA Journal of*

*Automatica Sinica*. 2017. Vol. 4. P. 830–847. DOI:10.1109/JAS.2017.7510364.

6. *Zhang T., Dai J.* Electric power intelligent inspection robot: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1750. Article 012023. DOI 10.1088/1742-6596/1750/1/012023.

7. *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. P. 303–308. DOI: 10.1109/SII52469.2022.9708835.

8. *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. Article 1047359. DOI 10.3389/fenrg.2022.1047359.

9. *Qin X., Wu G., Lei J. [et al.]*. A Novel Method of Autonomous Inspection for Transmission Line based on Cable Inspection Robot LiDAR Data // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Article. 596. DOI 10.3390/s18020596.

10. *Zheng J., Chen T., He J. [et al.]* Review on Security Range Perception Methods and Path-Planning Techniques for Substation Mobile Robots // *Energies*. 2024. Vol. 17(16). Article. 4106. DOI 10.3390/en17164106.

11. *Luo S., Zhang M., Zhuang Y.* A survey of path planning of industrial robots based on rapidly exploring random trees // *Frontiers in Neurorobotics*. 2023. Vol. 17. DOI 10.3389/fnbot.2023.1268447.

12. *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. 24 (11). Article 3494. DOI 10.3390/s24113494.

13. Unity Real-Time Development Platform. URL: <https://unity.com> (дата обращения 30.01.2026).

14. *Abdulsheh J., Kadhim, D.* Classical and Heuristic Approaches for Mobile Robot Path Planning: A Survey // *Robotics*. 2023. 12 (4). Article 93. DOI 10.3390/robotics12040093.

15. *Biundini L., Pinto M., Melo A. [et al.]*. A Framework for Coverage Path Planning Optimization Based on Point Cloud for Structural Inspection // *Sensors*. 2021., 21 (2). Article 570. DOI 10.3390/s21020570.

16. *Mansouri S., Kanellakis C., Fresk E. [et al.]*. Co-operative coverage path planning for visual inspection // *Control Engineering Practice*. 2021. 74. 118-131. DOI 10.1016/j.conengprac.2018.03.002.

17. *Williams A., Barrus J.* An Efficient and Robust Ray-Box Intersection Algorithm // *Journal of Graphics Tools*. 2005. Vol. 10, No. 1. DOI:10.1145/1198555.1198748.

18. NWH Vehicle Physics 2 Documentation. URL: <https://nwhvehiclephysics.com> (дата обращения 30.01.2026).

19. *Perlin K.* An Image Synthesizer // *SIGGRAPH*. 1985. P. 287–296. DOI 10.1145/325165.325247.

## Method for Motion Route Planning of a Ground Robotic System for Substation Equipment Condition Monitoring and Technical Diagnostics

Ya. V. Brenchuk, Master student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

S. A. Eroshenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

I. V. Matveev, Post-graduate, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

*This paper presents a method for planning and verifying motion routes of ground robotic systems intended for automated diagnostics of high-voltage substation equipment. The relevance of the study is driven by the need to improve maintenance safety and efficiency under the conditions of severe aging of power infrastructure and increasing requirements for predictive monitoring. The proposed routing system is integrated into a 3D substation model and relies on a combination of geometric, algorithmic, and kinematic methods to generate an optimal trajectory with guaranteed coverage of diagnostic targets. The algorithm comprises sequential stages of site segmentation, discretization of the navigable space, filtering of candidate deployment (base) points according to operational constraints, visibility analysis based on ray tracing and oriented bounding volumes, and optimization of the inspection sequence considering the platformkinematic characteristics. Motion control is implemented using a combination of PID regulation providing stable path following under limited maneuverability and complex spatial layouts typical for substations. The method's performance is validated through simulation in Unity using a 3D model of a 220 kV substation. The conducted experiments demonstrate full coverage of target objects and stable motion along the planned route. The results confirm the applicability of the proposed solution to automated diagnostics in power facilities and its potential for integration into digital twins of substations.*

**Keywords:** Ground robotic system, equipment diagnostics, inspection route, base point, 3D Model, Unity, Open Switchgear.

Получено: 11.02.26

### Образец цитирования

Бренчук Я. В., Ерошенко С. А., Матвеев И. В. Метод построения маршрута движения наземного робототехнического комплекса для задач технической диагностики подстанционного оборудования // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 2. С. 90–99. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-90-99.

### For Citation

Brenchuk Ya.V., Eroshenko S.A., Matveev I.V. [Method for Motion Route Planning of a Ground Robotic System for Substation Equipment Condition Monitoring and Technical Diagnostics]. *Intellektual'nyesistemy v proizvodstve*. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 90-99 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-90-99.