

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В данной работе рассматривается новый способ измерения и расчета угла наклона (крена) железнодорожной опоры или опоры контактной сети с помощью летящего по прямолинейной траектории беспилотного летательного аппарата, параллельно железнодорожному пути. Проведен обзор существующих методов измерения, указаны их достоинства и недостатки. В рассматриваемом методе предлагается производить измерения углов и расстояний шестью лазерными сканирующими дальномерами, установленными по три штуки на горизонтальной и наклонной плоскостях беспилотного летательного аппарата. Это позволяет повысить быстродействие и точность определения угла наклона вертикально расположенных опор. В расчетах используются минимальные расстояния от лазерного сканирующего дальномера до верхней и нижней частей поверхности опор. В формулах используются геометрические соотношения и теорема косинусов для вычисления крена опор с учетом их конусности. 3-кратное измерение расстояний и углов позволяет провести по ним усреднение, что значительно повышает точность расчётов. Проведен модельный эксперимент на макете железобетонной опоры контактной сети в четырех ориентациях. Сделано сравнение теоретически рассчитанных и измеренных экспериментально расстояний и углов наклона. Точность определения параметров соответствует нормативным требованиям.

Ключевые слова: опора контактной сети, угол наклона, диагностирование, лазерный сканирующий дальномер, беспилотный летательный аппарат, видеокамера, метод минимальных расстояний, безопасность ж/д транспорта.

1. Постановка задачи. Диагностика технического состояния и остаточного ресурса опор контактной сети (КС) является важной частью контроля безопасной работы железной дороги по перевозке грузов [1, 2]. Необходим постоянный мониторинг большого количества опор контактной сети системы электроснабжения стоящих вдоль путей. Одним из параметров контроля является измерение угла наклона опоры (далее крен), т.е. насколько сильно и в какую сторону произошел наклон [3, 4]. Крен можно измерять в градусах, радианах и в процентах от высоты. Наклон опоры измеряется между вертикальной линией и осью симметрии опоры. По техническим условиям эксплуатации допустимо смещение вершины опоры параллельно ж/д пути 3 %, а перпендикулярно 2 % от высоты опоры [5]. Измерение крена традиционными геодезическими методами, например с помощью теодолитов, занимает много времени. Необходимы методы экспресс-контроля величины наклона с последующей оценкой технического состояния опоры. В работе предлагается быстродействующий способ измерения крена с учетом конусности опор с помощью беспи-

лотного летательного аппарата (БПЛА). В настоящее время активно развиваются технологии с использованием БПЛА в различных областях науки и техники [6–12]. Например, такие методы применяются для контроля сельскохозяйственных полей, создания и проверки кадастровых карт различного типа, оценки состояния почвы и растений, культивируемых на полях [6, 7, 9]. БПЛА используются для мониторинга состояния опор линий электропередач, проводов, степени утечки электрической энергии с проводов, их нагрева и состояния изоляторов [10, 13, 14]. Относительно невысокая стоимость БПЛА вместе с оперативностью передачи данных по каналам связи для последующей компьютерной обработки дает эффективный инструмент мониторинга за состоянием опор [11, 12].

2. Краткий обзор методов измерения крена инженерных сооружений башенного типа. Аналогичная задача по измерению крена технических сооружений башенного типа, таких как дымовые и вентиляционные трубы, колонны, водонапорные башни, антенные опоры и др. описаны в [15, 16] и приведённых в них обзорах литературы. С по-

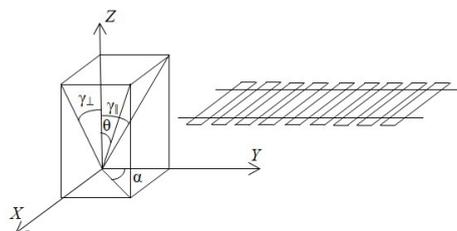


Рис. 1. Показаны углы в сферической системе координат θ , α и углы γ_1 , γ_2 , используемые для контроля угла отклонения опор КС

мощью различных приборов теодолитов, лазерных дальномеров, инклинометров и т.п. определяются расстояния и углы между различными направлениями. Далее с помощью геометрической теоремы косинусов, свойств окружностей, треугольников находят отклонения от вертикали инженерных сооружений. Такой способ определения угла наклона сооружений еще называют методом триангуляции, хорошо известный в геодезии [15]. Все измерительные приборы предполагаются неподвижными в пространстве. Подвижной в виде вращения вокруг вертикальной и горизонтальной осей является приборная часть БПЛА, использующая в лазерном сканирующем дальномере (ЛСД) лазерный луч для измерения углов и расстояний. В работах [15, 16] отмечается, что для измерений наклона опоры можно использовать БПЛА, но не приведены конкретные расчетные схемы.

В данной работе предлагается способ измерения крена с подвижной платформы БПЛА. Приведены геометрические соотношения, позволяющие провести математическую обработку измерений и рассчитать с требуемой точностью угол крена опоры. Для иллюстрации возможностей данного метода измерений был проведен и далее описан модельный эксперимент. Для определения крена нужно знать не только угол θ отклонения от вертикали, но и его ориентацию, то есть угол α относительно ж/д путей, этот наклон показан на рис. 1. В сферической системе координат угол θ называется зенитным, а угол α — азимутальным. Традиционно углы измеряются в двух вертикальных перпендикулярных плоскостях вдоль и поперек пути [2]. Аналогично работе [2] значение угла γ_1 наклона опоры вдоль пути по направлению скорости БПЛА будем считать положительным, а против — отрицательным. Углу γ_1 отклонения опоры от пути присваиваем знак минус, а при наклоне к пути — знак плюс. Ось Y направлена вдоль путей в направлении скорости БПЛА. Ось X перпендикулярно, а ось Z вертикально, как показано на рис. 1.

Задача измерения угла наклона ж/д опор решается различными способами [2]. Например, с помощью инклинометра определяется направление наибольшего наклона опоры. Более предпочтительными являются методы дистанционного измерения с помощью лазерных дальномеров. Наиболее просто [3] рассматривать крен только в плоскости максимального наклона, который определяется предварительным визуальным осмотром и последующей проверкой с помощью инклинометра. Далее в этой плоскости проводятся измерение горизонтального смещения вершины от вертикальной ориентации опоры. Расстояния можно измерять с помощью лазерных дальномеров с погрешностью ± 1 мм

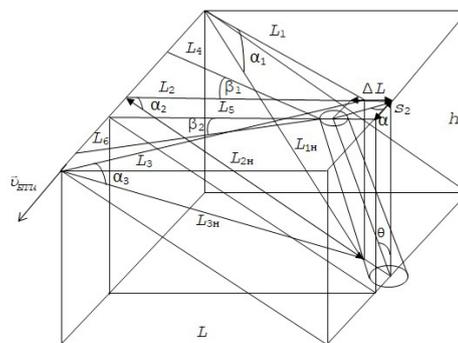


Рис. 2. Изображена опора с наклоном от путей и вдоль $\vec{v}_{\text{БПЛА}}$ скорости движения БПЛА. Обозначены расстояния, измеренные всеми шестью ЛСД

и меньше. Затем, измеряя высоту, вычисляется угол θ отклонения от вертикали.

3. Основные положения предлагаемого метода измерения. Предлагаемый способ измерений с помощью БПЛА назовем «методом минимальных расстояний». Измерения будут проводиться с помощью шести лазерных сканирующих дальномеров, расположенных попарно в трех вертикальных плоскостях, установленных на БПЛА. Такое количество ЛСД использовано для повышения точности измерения углов. В общем случае для измерений достаточно использовать два ЛСД, для конусной формы опоры с поперечным сечением в виде круга. Современные ЛСД с частотой более 8000 отсчетов в секунду могут измерять расстояния от БПЛА до конусной опоры, сохраняя их в памяти. БПЛА летит по прямой параллельной линии путей на высоте h и расстоянии L от опор (рис. 2).

Контроль траектории БПЛА осуществляется с помощью внешних и внутренних инерциальных навигационных систем отсчета. При пролете БПЛА измерения производит первая пара верхнего и нижнего ЛСД, лежащая в одной вертикальной плоскости, расположенной под углом β_1 к плоскости перпендикулярной линии путей. Далее при движении БПЛА напротив опоры делает измерения вторая пара ЛСД, лежащая в перпендикулярной плоскости. Наконец, при удалении от опоры делает измерение третья пара ЛСД, лежащая в вертикальной плоскости, расположенной под углом β_2 . Предполагается известная марка опоры КС, а следовательно, ее характеристики: конусность, высота, глубина подземной части. Тогда по известному расстоянию от вершины опоры можно определить радиусы сечения на любом уровне. На БПЛА установлена также цифровая видеочкамера с высоким разрешением, позволяющая оператору осуществлять визуальный контроль за процессом измерений и внешним видом опоры.

Три верхних ЛСД измеряют многократно расстояния (рис. 2) в горизонтальной плоскости до верхнего сечения опоры. В приборах среди измеренных расстояний запрограммированно выбираются три минимальных L_4 , L_5 , L_6 до одной и той же точки O_2 на верхнем сечении опоры (рис. 3). Три нижних ЛСД лежат в плоскости, ориентированной под углом α_2 вниз к горизонту, и измеряют расстояния до поверхности в нижней части опоры. Отрезки $L_{1н}$, $L_{2н}$, $L_{3н}$ определяются как минимальные расстояния до одной той же точки в нижней части

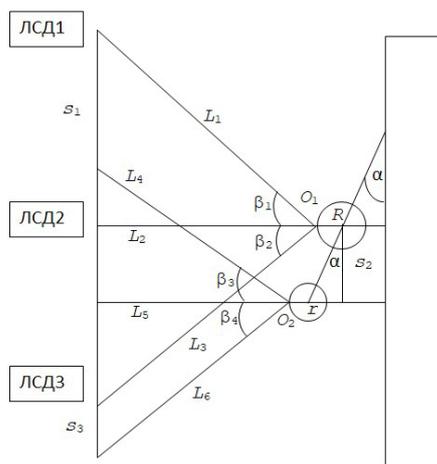


Рис. 3. Вид сверху на пространственное положение измеряемых расстояний

образующей сечения опоры. Отрезок L_5 , измеряемый верхним ЛСД, лежит в горизонтальной плоскости и перпендикулярен к железнодорожному пути. Два остальных верхних ЛСД также выбирают среди измеренных минимальные расстояния L_4 , L_6 , лежащие в горизонтальной плоскости и направленные под углами β_1 , β_2 соответственно к отрезку L_5 .

Углы α_1 , β_1 , β_2 были взяты равными 45 градусам. Технические характеристики современных ЛСД позволяют измерять эти расстояния с шагом 1 мм вдоль траектории движения БПЛА. В результате измерений получаем в виде множества точек две практически непрерывные образующие линии верхнего и нижнего сечений опоры. Эти данные можно записывать на флэш-память, либо передавать по каналу связи для обработки информации. Заметим, что на рис. 2 показана пространственная картина измеренных всеми ЛСД минимальных расстояний в последовательные моменты времени. Напомним, что радиус сечения можно вычислить на любой заданной высоте по известным техническим характеристикам опоры. Это позволяет определить положения центров верхнего и нижнего горизонтальных с радиусами r и R соответственно сечений. Далее, как показано на рис. 2, можно определить азимутальный угол α наклона по отношению к направлению ж/д рельсам и крен θ в вертикальной плоскости.

На рис. 3 $s_1 = v_{\text{БПЛА}} t_1$, $s_2 = v_{\text{БПЛА}} t_2$, $s_3 = v_{\text{БПЛА}} t_3$ — это расстояния, которые пролетает БПЛА по прямой от начального положения в пространстве в момент измерения расстояния до точки O_1 на поверхности нижнего сечения до второго положения в пространстве в момент измерения расстояния до точки O_2 на поверхности опоры верхнего сечения тремя парами ЛСД. L_1 , L_2 , L_3 — проекции на горизонтальную плоскость минимальных расстояний $L_{1н}$, $L_{2н}$, $L_{3н}$ измеренных в БПЛА нижними ЛСД (рис. 2). Заметим, что нижнее сечение опоры радиусом R получается пересечением ее горизонтальной плоскостью. Очевидно, что расстояния связаны геометрически следующим образом: $L_1 = L_{1н} \cos \alpha_1$, $L_2 = L_{2н} \cos \alpha_2$, $L_3 = L_{3н} \cos \alpha_3$ на рис. 3. L_4 , L_5 , L_6 — минимальные расстояния от трех верхних ЛСД до точки O_2 верхнего сечения опоры. Из рис. 3 видно, что смещение центра сечений в перпендикулярном направлении равно ΔL . Далее вычисляем $\langle L_2 \rangle$ как среднее значение проекций L_1 , L_2 , L_3 на перпен-

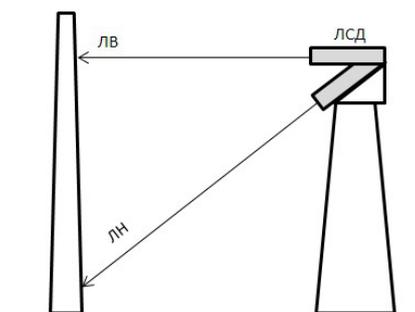


Рис. 4. Схема эксперимента при измерениях параметров расстояния до опоры КС при помощи ЛСД систем (вид сбоку), где ЛВ — луч верхнего лазера верхнего ЛСД, ЛН — луч нижнего лазера нижнего ЛСД, в момент измерения

дикуляр к пути. Теперь можем вычислить тангенс азимутального угла $\text{tg} \alpha = \Delta L / s_2$. Среднее расстояние s_2 , пройденное БПЛА от измерения напротив нижнего сечения до измерения напротив верхнего сечения. Зная моменты времени, когда производятся измерения и скорость $v_{\text{БПЛА}}$ полета БПЛА с учетом геометрических соотношений, получим s_2 . Расстояние L_3 , измеренное с помощью ЛСД2 до точки O_2 верхнего сечения геометрически, можно выразить через измерения боковых расстояний L_4 и L_6 с помощью ЛСД1 и ЛСД3. Зная L_5 и s_2 , получим тангенс угла $\text{tg} \theta = (\Delta L_2 + s_2^2)^{1/2} / h$.

4. Описание эксперимента. Описанный выше способ измерения наклона опоры был реализован в модельном эксперименте на уменьшенной копии опоры КС. Из хорошо отражающего белого картона был изготовлен макет опоры высотой 600 мм. Макет опирался нижней частью на полусферу и мог иметь различные углы крена до 25 градусов. Для оценки практической реализации данного метода было проведено 4 цикла экспериментальных измерений с различными углами наклона и ориентации макета опоры в пространстве: 1) [$\alpha = 0^\circ$ $\theta = 0^\circ$]; 2) [$\alpha = 0^\circ$ $\theta = 10^\circ$]; 3) [$\alpha = 45^\circ$ $\theta = 10^\circ$]; 4) [$\alpha = 90^\circ$ $\theta = 10^\circ$].

Для удобства измерений макет опоры помещался на стол. Азимутальный угол α отсчитывался от направления длинной стороны стола (имитация расположения вдоль ж/д путей и соответствует оси Y) и зенитный угол с вертикалью θ показаны на рис. 1. Работа БПЛА имитировалась ЛСД, закрепленным на штативе на высоте 550 мм от поверхности стола. Этот штатив помещался на другой длинный горизонтально расположенный стол и мог двигаться параллельно первому столу. ЛСД измеряло расстояния и углы наклона (с помощью встроенного в ЛСД цифрового двухосевого инклинометра) с горизонталью и вертикалью от плоскости YZ . Измерение углов поворота на рис. 3 $\beta_1 = \beta_2 = 45$ градусов вокруг вертикальной оси Z , отсчитывались по обычному транспорту. Общий вид и принцип снятия показаний при проведении эксперимента представлен на рис. 4 в плоскости XZ (вид сбоку) и в плоскости XY (вид сверху) (рис. 5). Отсчет значений углов показан на рис. 1 в соответствии с применяемой на ж/д схемой по контролю за опорами [1].

Полет БПЛА имитировался перемещением штатива по прямой с закрепленным на нем ЛСД, с ша-

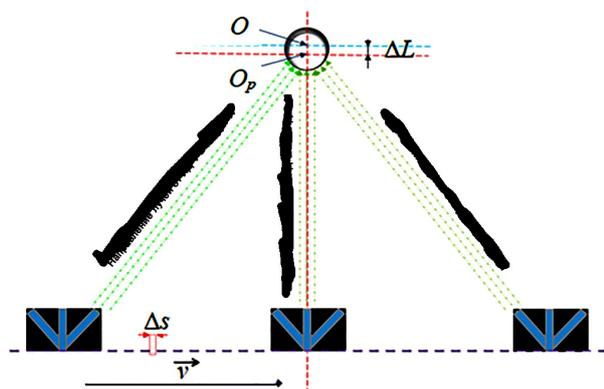


Рис. 5. Схема эксперимента при измерениях расстояний до опоры КС при помощи ЛСД [$\alpha = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$] (вид сверху), где Δs — интервал смещения ЛСД при повторном измерении расстояния, ΔL — интервал смещения центра сечений в перпендикулярном направлении, O — центральное положение вертикальной оси опоры (ось Z), O_p — реальное положение вертикальной оси опоры в момент измерения, v — скорость (направление) движения ЛСД

гом Δs , равным 10 мм (рис. 5). Прямая линия траектории ЛСД на штативе вдоль длинной стороны стола (т.е. имитация полета БПЛА параллельно ж/д пути вдоль оси Y) находится на расстоянии L от вертикальной оси (ось Z) макета опоры (рис. 2). Заметим, что расстояния L можно выразить через L_2 . Сначала измерялись расстояния до образующей верхнего сечения макета, а затем отсчитаны расстояния до нижней образующей. При проведении измерений мы определяли минимальные расстояния до поверхности опоры на уровне верхнего сечения для трех положений ЛСД в горизонтальной плоскости и под углами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ к этой же плоскости измерены тремя нижними ЛСД минимальные расстояния к нижнему сечению опоры. При проведении эксперимента были измерены и зафиксированы расстояния и углы, представленные ниже и в табл. 1. Соответствующие параметры $L_{1н} = 866$ (мм), $\alpha_1 = 35,3^\circ$, $\beta_1 = 45^\circ$, $L_{2н} = 707$ (мм), $\alpha_2 = 45^\circ$, $\beta_2 = 45^\circ$, $L_{3н} = 866$ (мм), $\alpha_3 = 35,3^\circ$. Радиусы горизонтальных сечений макета опоры в верхней части $r = 62$ (мм) на высоте 550 (мм) и нижней —

$R = 78$ (мм) на высоте 50 (мм). Для всех указанных ориентаций опор данные параметры постоянные.

При проведении реального эксперимента на железной дороге все необходимые параметры для расчетов и вычислений углов наклона θ опор КС по предложенному нами методу оператор БПЛА сможет использовать и задавать данные описанного в статье измерительного комплекса и встроенного в БПЛА навигационного оборудования (с заранее занесенной в его память электронной картой местности высокого качества требующегося участка ж/д пути при проведении текущих измерений).

Ниже, в табл. 1, приведены значения, ожидаемые теоретические (теор.) и практические (прк.) данные измерения, полученные в результате проведенного эксперимента, обнаруженные отклонения происходят в пределах ± 5 мм.

Выводы. В работе описан метод измерения угла отклонения θ опор КС системы электроснабжения ж/д транспорта. Метод основан на бесконтактных измерениях расстояний от ЛСД, расположенного на борту БПЛА, до опор КС.

По результатам проведенного анализа существующих и используемых на практике современных методов контроля опор КС можно сделать вывод, что они все более оценочные и статистические, основанные на начальном этапе контроля опоры на внимательности и визуальном восприятии степени угла наклона опоры θ оператором, то есть на человеческом факторе, который может объединять множество случайных и вероятностных ошибок, и это будет приводить к пропуску реальных нарушений, ошибочным положительным заключениям о допустимом угле наклона опоры или же к большой затрате рабочего времени на проведение второй стадии контроля и измерений (более трудоемкой, технически сложной и затратной по времени) с использованием существующих методов, в основе которых менее точное, маломобильное оборудование и ошибки (наличие человеческого фактора), то есть опоры с ложной дефектовкой на основе визуального восприятия угла наклона опоры θ оператором на начальном этапе контроля [1, 2, 15]. Поскольку выявление крена с превышением максимально допустимого угла отклонения опор, всего на 2–3 градуса, основано на человеческом факторе и чаще всего визуально слабо заметно, а выявляются чаще после возникновения на данном

Таблица 1

Значения параметров для расчета угла наклона опор КС

Параметры, мм		s_2	L_4	L_5	L_6	ΔL	$\angle \alpha$ (град.)	$\angle \theta$ (град.)
Опора 1 $\alpha = 0^\circ$ $\theta = 0^\circ$	теор.	0	731	517	731	0°	0°	0°
	прк.	5	726	523	719	0,7°	3,1°	0,7°
Опора 2 $\alpha = 0^\circ$ $\theta = 10^\circ$	теор.	88	731	517	731	10°	0°	10°
	прк.	82	726	509	734	9,3°	3,5°	9,3°
Опора 3 $\alpha = 45^\circ$ $\theta = 10^\circ$	теор.	62	643	454	643	10°	45°	10°
	прк.	58	649	448	647	9,2°	44,5°	9,2°
Опора 4 $\alpha = 90^\circ$ $\theta = 10^\circ$	теор.	0	606	429	606	10°	90°	10°
	прк.	4	604	427	611	9,6°	87,3°	9,6°

участке ж/д предаварийной или аварийной ситуации [1] или же случайного пропуска дефекта [2].

В предложенном, экспериментально промоделированном и описанном в данной работе методе, названном «методом минимальных расстояний», (объединили два предложения), все измерения расстояний до опоры выполняются многократно и в нескольких плоскостях, с высокой точностью и скоростью измерения этих параметров. Что также при качественной математической обработке и усреднении полученных многократно измерений значительно повышает точность расчетов и компенсирует случайные ошибки. Для повышения точности и информативности предложено использовать блок из шести ЛСД, выполняющих высокочастотный цикл измерений расстояний (от 8000 раз в секунду) при полете вблизи объекта исследования (порядка 1-й, 2-х высот объекта) и не выше его высоты.

И поскольку предполагается использовать в предложенном методе БПЛА, то можно утверждать, что метод будет не только более мобильным, более точным и более быстрым [10–12]. Для проведения контроля опор (на мосту или в болотистой местности) находиться рядом с опорой (для использования приборов контроля прямого взаимодействия с опорой) не всегда допустимо, а также находить множество надежных, устойчивых площадок на земле для расположения существующего оборудования оптического контроля (теодолитов и др.) для проведения многократных измерений в нескольких плоскостях (т.е. с разных точек на земле) не всегда возможно. Для получения оператором, использующим традиционное оборудование, такого же количества данных измерений и такого же уровня их точности, которое выполняется предложенной в работе методом при одном пролёте вдоль линии ж/д пути с помощью измерительного комплекса, установленного на БПЛА. Это сравнение показывает, что предложенный в работе метод дает возможность оперативно и точно контролировать угол наклона опоры КС системы электроснабжения железнодорожного транспорта.

В результате проведенной работы получены выражения и проведена экспериментальная проверка четырех вариантов отклонения железобетонной опоры КС относительно ж/д пути с требуемой точностью для данного вида измерений.

Библиографический список

1. Галкин А. Г., Ковалев А. А. Совершенствование обслуживания контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2009. С. 40–43.
2. Аксенов Н. А., Ковалев А. А. Разработка прибора по контролю установочных параметров опоры контактной сети // Инновационный транспорт. 2017. № 4 (26). С. 49–53. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-49-53. EDN: ZXJQJH.
3. Ковалев А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор: моногр. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. 74 с.
4. Ковалев А. А., Маслов А. М., Аксенов Н. А. Применение мобильных средств диагностики опор контактной сети // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 77–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-77-79. EDN: XUFVAVN.
5. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). Введ. 11–12–2001. Москва: ТРАНСИЗДАТ, 2002. 184 с.

6. Aslan M. F., Durdu A., Sabanci K. [et al.]. A Comprehensive Survey of the Recent Studies with UAV for Precision Agriculture in Open Fields and Greenhouses // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (3). P. 1047. DOI: 10.3390/app12031047.

7. Aliyari M., Ashrafi B., Ayele Y. Z. Hazards identification and risk assessment for UAV-assisted bridge inspections // Structure and Infrastructure Engineering. 2022. Vol. 18, Issue 3. P. 412–428. DOI: 10.1080/15732479.2020.1858878.

8. Вильнер В. Г., Ларюшин В. Г., Рябокуль А. С. Оптико-электронные высотометры-скоростемеры на основе полупроводниковых лазеров для БПЛА // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 127–133. EDN: UIOYVR.

9. Fisher Ch. E., Sidharthadev J. Sidharthadev Mukherjee, Lott W. A. Geographic survey system for vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicles (UAVs). US patent 11216015B2; filed December 26, 2019; published January 4th, 2022.

10. Tang Z., Peng Y., Li J. [et al.]. UAV 3D Modeling and Application Based on Railroad Bridge Inspection // Buildings. 2024. Vol. 14 (1), Issue 26. P. 1–13. DOI: 10.3390/buildings14010026.

11. Wu T. W., Yu J. Y., Chen R. P. [et al.]. Research Progress of UAV Inclined Photogrammetry Technology and Its Engineering Applications // Journal of Human University (Natural Sciences). 2018. Vol. 45. P. 167–172. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2018.50.030.

12. Chen Y., Zhu Z., Lin Z. [et al.]. Building Surface Crack Detection Using Deep Learning Technology // Buildings. 2023. Vol. 13 (7). P. 1814. DOI: 10.3390/buildings13071814.

13. Zaidi M. A., Tariq F. Revolutionizing power line inspection: automated data acquisition through autonomous UAVs in simulated environment // South Florida Journal of Development. 2023. Vol. 4, № 3. P. 1199–1215. DOI: 10.46932/sfjdv4n3-014.

14. Azeem I., Zaidi M. A. Zero-Shot Learning-Based Detection of Electric Insulators in the Wild // Machine Learning, Optimization, and Data Science. Springer, 2021. P. 213–225. DOI: 10.1007/978-3-030-95470-3_16.

15. Шеховцов Г. А. Контроль пространственного положения и формы высоких сооружений башенного типа: моногр. / Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2018. 214 с. ISBN 978-5-528-00265-1.

16. Коломоец В. С. Современные способы наблюдений за отклонением сооружений башенного типа от вертикали // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Курск, 20–21 мая 2021 г. В 3 т. Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2021. Т. 3. С. 73–77. EDN: FSTKSD.

ШНЫПТЕВ Иван Алексеевич, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

ORCID: 0000-0002-1672-114X

Адрес для переписки: shnivan@rambler.ru

КУРМАНОВ Рамиль Султангареевич, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и химия» ОмГУПС, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 362133

AuthorID (SCOPUS): 8453108100

Адрес для переписки: kurmanovrs@mail.ru

СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Физика и химия» ОмГУПС, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 25109

AuthorID (SCOPUS): 57205080091

ORCID: 0000-0001-6909-4859

ResearcherID: AAP-2510-2021

Адрес для переписки: SosnovskiyUM@omgups.ru
КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.
SPIN-код: 5259-0531
AuthorID (РИНЦ): 358976
ORCID: 0000-0002-1815-4679
AuthorID (SCOPUS): 56824984500
Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Для цитирования

Шныптев И. А., Курманов Р. С., Сосновский Ю. М., Кузнецов А. А. Разработка метода определения угла наклона опор контактной сети железнодорожного транспорта // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 157 – 164. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-157-164.

Статья поступила в редакцию 06.02.2024 г.

© **И. А. Шныптев, Р. С. Курманов,
Ю. М. Сосновский, А. А. Кузнецов**

DEVELOPMENT METHOD OF DETERMINING ANGLE OF THE RAILWAY CONTACT NETWORK SUPPORT INCLINATION

This paper discusses a new method for measuring and calculating the angle of inclination of a railway support or a contact network support, using an unmanned aerial vehicle flying along a straight path, parallel to the railway track. A review of existing measurement methods is carried out, their advantages and disadvantages are indicated. In the method under consideration, it is proposed to measure angles and distances with six laser scanning rangefinders installed in threes on horizontal and inclined planes on an unmanned aerial vehicle. This allows you to increase the speed and accuracy of determining the angle of inclination of vertical supports. The calculations use the minimum distances from the laser scanning range finder to the top and bottom of the support surface. The formulas use geometric relationships and the cosine theorem to calculate the roll of supports taking into account their taper. Measuring distances and angles three times allows for averaging over them, which significantly increases the accuracy of calculations. A model experiment is carried out on a model of a reinforced concrete contact network support in four orientations. A comparison is made between theoretically calculated and experimentally measured distances and inclination angles. The accuracy of parameter determination complies with regulatory requirements.

Keywords: overhead contact line support, tilt angle, diagnostics, laser scanning rangefinder, unmanned aerial vehicle, video camera, minimum distance method, railway transport safety.

References

1. Galkin A. G., Kovalev A. A. Sovershenstvovaniye obsluzhivaniya kontaktnoy seti s uchetom protsessa razregulirovok opor [Improvement of maintenance of the contact network taking into account the process of adjustment of supports] // *Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta. Science and Transportation. Modernization of Railway Transport*. 2009. P. 40–43. (In Russ.).
2. Aksenov N. A., Kovalev A. A. Razrabotka pribora po kontrolyu ustanovochnykh parametrov opory kontaktnoy seti [Device development under the control of attitudinal parameters of a support of a contact network] // *Innovatsionnyy transport. «Innotrans» Journal*. 2017. No. 4 (26). P. 49–53. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-49-53. EDN: ZXJQJH. (In Russ.).
3. Kovalev A. A. Formirovaniye upravlyayushchikh vozdeystviy na kontaktnoy seti s uchetom protsessa razregulirovok opor [Application of mobile means of diagnostics of overhead catenary supports]. Ekaterinburg, 2013. 74 p. (In Russ.).
4. Kovalev A. A., Maslov A. M., Aksenov N. A. Primeneniye mobil'nykh sredstv diagnostiki opor kontaktnoy seti [The use of mobile devices for catenary supports diagnostics] // *Transport Urala. Transport of the Urals*. 2018. No. 2 (57). P. 77–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-77-79. EDN: XUFVAVN. (In Russ.).
5. Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog (TsE-868) [Electrified railways contact network design and technical operation rules (CE-868)]. Moscow, 2002. 184 p. (In Russ.).
6. Aslan M. F., Durdu A., Sabanci K. [et al.]. A Comprehensive Survey of the Recent Studies with UAV for Precision Agriculture in Open Fields and Greenhouses // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12 (3). P. 1047. DOI: 10.3390/app12031047. (In Engl.).
7. Aliyari M., Ashrafi B., Ayele Y. Z. Hazards identification and risk assessment for UAV-assisted bridge inspections // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022. Vol. 18, Issue 3. P. 412–428. DOI: 10.1080/15732479.2020.1858878. (In Engl.).
8. Vilner V. G., Laryushin V. G., Ryabokul A. S. Optiko-elektronnyye vysotomery-skorostemery na osnove poluprovodnikovyykh lazerov dlya BPLA [Optoelectronic speed measuring altimeters based on semiconductor lasers for UAV] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy Energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2015. No. 5–6. P. 127–133. EDN: UIOYVR. (In Russ.).
9. Fisher Ch. E., Sidharthadev J. Sidharthadev Mukherjee, Lott W. A. Geographic survey system for vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicles (UAVs). US patent 11216015B2; filed December 26, 2019; published January 4th, 2022. (In Engl.).
10. Tang Z., Peng Y., Li J. [et al.]. UAV 3D Modeling and Application Based on Railroad Bridge Inspection // *Buildings*. 2024. Vol. 14 (1), Issue 26. P. 1–13. DOI: 10.3390/buildings14010026. (In Engl.).

11. Wu T. W., Yu J. Y., Chen R. P. [et al.]. Research Progress of UAV Inclined Photogrammetry Technology and Its Engineering Applications // *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*. 2018. Vol. 45. P. 167–172. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2018.S0.030. (In Engl.).
12. Chen Y., Zhu Z., Lin Z. [et al.]. Building Surface Crack Detection Using Deep Learning Technology // *Buildings*. 2023. Vol. 13 (7). P. 1814. DOI: 10.3390/buildings13071814. (In Engl.).
13. Zaidi M. A., Tariq F. Revolutionizing power line inspection: automated data acquisition through autonomous UAVs in simulated environment // *South Florida Journal of Development*. 2023. Vol. 4, no. 3. P. 1199–1215. DOI: 10.46932/sfjdv4n3-014. (In Engl.).
14. Azeem I., Zaidi M. A. Zero-Shot Learning-Based Detection of Electric Insulators in the Wild // *Machine Learning, Optimization, and Data Science*. Springer, 2021. P. 213–225. DOI: 10.1007/978-3-030-95470-3_16. (In Engl.).
15. Shekhovtsov G. A. Kontrol' prostranstvennogo polozheniya i formy vysokikh sooruzheniy bashennogo tipa [Control of spatial position and shape of tall tower-type structures]. Nizhny Novgorod, 2018. 214 p. ISBN 978-5-528-00265-1. (In Russ.).
16. Kolomojets V. S. Sovremennyye sposoby nablyudeniya za otkloneniym sooruzheniy bashennogo tipa ot vertikali [Modern methods of observing the deviation of tower-type structures from the vertical] // *Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany. Youth and Systemic Modernization of the Country*. In 3 vols. Kursk, 2021. Vol. 3. P. 73–77. EDN: FSTKSD. (In Russ.).

SHNYPTEV Ivan Alekseevich, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.
ORCID: 0000-0002-1672-114X
Correspondence address: shnivan@rambler.ru

KURMANOV Ramil Sultangareevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Chemistry Department, OSTU, Omsk.
AuthorID (RSCI): 362133
AuthorID (SCOPUS): 8453108100
Correspondence address: kurmanovrs@mail.ru
SOSNOVSKY Yuri Mikhailovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Physics and Chemistry Department, OSTU, Omsk.
AuthorID (RSCI): 25109
AuthorID (SCOPUS): 57205080091
ORCID: 0000-0001-6909-4859
ResearcherID: AAP-2510-2021
Correspondence address: SosnovskiyUM@omgups.ru
KUZNETSOV Andrei Albertovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.
SPIN-code: 5259-0531
AuthorID (RSCI): 358976
ORCID: 0000-0002-1815-4679
AuthorID (SCOPUS): 56824984500
Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

For citations

Shnyptev I. A., Kurmanov R. S., Sosnovsky Y. M., Kuznetsov A. A. Development method of determining angle of the railway contact network support inclination // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3 (191). P. 157–164. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-157-164.

Received February 06, 2024.

© I. A. Shnyptev, R. S. Kurmanov,
Yu. M. Sosnovsky, A. A. Kuznetsov