

**Информация об авторах**

**Атапин Виталий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Самарский государственный университет путей сообщения, ведущий инженер методико-технологического департамента Научно-производственного центра информационных и транспортных систем, г. Самара, e-mail: vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

**Чекин Артем Анатольевич** – старший преподаватель кафедры пути и путевого хозяйства, Самарский государственный университет путей сообщения, ведущий инженер методико-технологического департамента Научно-производственного центра информационных и транспортных систем, г. Самара e-mail: chekin@infotrans-logistic.ru

**Баширов Артур Васильевич** – факультет Строительства железных дорог и информационных технологий, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: artur-bashirov-98@mail.ru

**Information about the authors**

**Vitalii V. Atapin** – Ph.D. in Engineering Science, Senior Lecturer of the Subdepartment of Railway Track and Railway Equipment, Samara State Transport University, lead engineer of the methodical and technological department of INFOTRANS, Samara, e-mail: vitap88@rambler.ru; atapin@infotrans-logistic.ru

**Artyom A. Chekin** – lector of the Subdepartment of Railway Track and Equipment, Samara State Transport University, lead engineer of the methodical and technological department of INFOTRANS, Samara, e-mail: chekin@infotrans-logistic.ru

**Artur V. Bashirov** – student of the Subdepartment of Construction of Railway Tracks and Unformation Technology, Samara State Transport University, Samara, e-mail: artur-bashirov-98@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

УДК 621.332

**Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава и модернизация систем контроля разрегулировки опор контактной сети**

С. Ф. Амиров✉, Т. Н. Бадретдинов, И. Н. Баянов

Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

✉ amirovsf@bk.ru

**Резюме**

Повышенные скорости движения и увеличение грузопотока на электрифицированных железных дорогах предъявляют высокие требования ко всей инфраструктуре, в том числе и к устройству контактной сети. Она как раз и является зачастую наиболее уязвимым элементом системы тягового электроснабжения. Это связано с тем, что наравне с воздействием климатических и природных явлений, сложных технических условий эксплуатации, она подвергается различным электрическим влияниям, а так как этот элемент электрифицированных железных дорог не имеет резерва ее основных компонентов, то к ней и предъявляются повышенные технические требования. В данной статье рассмотрена задача поиска наиболее рационального способа контроля состояний устройств контактной сети и определение их «слабых мест» в эксплуатации при совмещенном движении различных типов поездов. Проведен анализ нарушений контактной сети на основе теории Парето, определены наиболее частые виды нарушений устройств контактной сети, приведен краткий научный обзор имеющихся наработок по контролю разрегулировки железобетонных опор контактной сети. Также разработан алгоритм обработки полученных данных с измерительных датчиков для определения максимального угла отклонения опорных конструкций контактной сети. В предложенном способе измерения угла наклона опор, влияние конусности железобетонных стоек опор на точность измерений отсутствует. Методика исследования базируется на сборе и обработке исходных данных в целях поиска рационального решения вопроса диагностики устройств контактной сети.

**Ключевые слова**

железнодорожный транспорт, контактная сеть, опора контактной сети, диагностика контактной сети, диаграмма Парето, угол наклона железобетонных опор, разрегулировка

**Для цитирования**

Амиров С.Ф. Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава и модернизация систем контроля разрегулировки опор контактной сети / С. Ф. Амиров, Т. Н. Бадретдинов, И. Н. Баянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 138–145. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 01.04.2021, принята к публикации: 11.04.2021

**Analysis of damage of electric stock current collectors and modernization of catenary support misalignment control systems**

S. F. Amirov✉, T. N. Badretdinov, I. N. Bayanov

Tashkent State Transport University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan

✉ amirovsv@bk.ru

### Abstract

Increased traffic speeds and increased freight traffic on electrified railways place high demands on the entire infrastructure, including catenary devices. It is often the most vulnerable element of the traction power supply system. This is due to the fact that, along with the impact of climatic, natural phenomena and complex technical operating conditions, it is exposed to various electrical influences. And since this element of electrified railways does not have a reserve of its main components, it is subject to increased technical requirements. This article deals with the problem of finding the most rational way to control the state of the catenary devices and determine their gravest flaws in operation with the combined movement of various types of trains. It analyzes catenary faults based on the Pareto theory, determines the most frequent types of faults of catenary devices and gives a brief scientific review of the available developments on the control of the misalignment of reinforced concrete catenary supports. An algorithm has also been developed for processing the data obtained from measuring sensors to determine the maximum angle of deflection of catenary support structures. In the proposed method of measuring the inclination angle of the supports, the tapering of the reinforced concrete poles of the supports does not influence the measurement accuracy. The research methodology is based on the collection and processing of initial data in order to find a rational solution to the problem of diagnostics of catenary devices.

### Keywords

railway transport, catenary, catenary supports, catenary diagnostics, the Pareto diagram, angle of inclination of reinforced concrete supports, misalignment

### For citation

Amirov S. F., Badretdinov T. N., Bayanov I. N. K analizu povrezhdenii tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava i modernizatsiya sistem kontrolya razregulirovki opor kontaktnoi seti [Analysis of damage of electric stock current collectors and modernization of catenary support misalignment control systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 138–145. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).138-145

### Article info

Received: 17.03.2021, Revised: 01.04.2021, Accepted: 11.04.2021

### Введение

С повышением скоростей движения и увеличением грузопотока к объектам электрифицированной железной дороги предъявляются высокие требования, в частности к устройству контактной сети. Одним из таких требований является соблюдение геометрии расположения контактной подвески для обеспечения надежности токосъема при заданных скоростях движения, а также обеспечения безопасного движения поездов с минимальными эксплуатационными затратами.

На начало 2020 г. протяженность электрифицированного участка Узбекских железных дорог составляет 1 646 км, в том числе скоростной участок, где скорости движения электроподвижного состава «Afrosiyob» Talgo 250 (производства испанской компании «Patentes Talgo S.L.») превышают 200 км/ч – 718,6 км. На железнодорожных участках Республики Узбекистан, предназначенных для скоростного движения, эксплуатируются поезда с локомотивами разных серий и электропоездов с различными массами и скоростями. На большей части электрифицированных железных дорог сооружена полукомпенсированная контактная подвеска, и только на участках, где проходят скоростные поезда, применяется компенсированная контактная подвеска [1].

Проект перехода на высокоскоростное движение в 2011 г. осуществлялся с помощью зарубежных

специалистов компании АО «Универсал – контактная сеть», которая спроектировала контактную подвеску КС-250-UZ для участка Ташкент – Самарканд под скорости 250 км/ч [2]. Последующие проекты электрификации или реконструкции контактной подвески под скоростное движение осуществляются собственными силами проектных и строительных организации АО «Ўзбекстон темир йуллари» (АО «Узбекские железные дороги»).

### Анализ повреждений токоприемников

На сегодняшний момент на электрифицируемых железных дорогах Республики Узбекистан мало внимания уделяется детальному контролю диагностирования состояния объектов тягового электрооборудования, а имеющиеся в наличии средства диагностирования контактной сети не в полной мере удовлетворяют требованиям эксплуатации устройств электрооборудования в связи с недостаточным количеством определяемых параметров контактной сети. Это приводит к низкому качеству и неточности прогноза показателей срока службы и момента предотказного состояния устройств контактной сети [3]. Согласно статистике локомотивной службы АО «Ўзбекстон темир йуллари» за 2019 г. о поломках токоприемников различных типов локомотивов по локомотивному депо «Узбекистан» на основании предполагаемых причин поломки токо-

приемников была построена диаграмма Парето (рис. 1) для определения процентной доли каждого из видов нарушения и выявления основных нарушений [4]. Проанализировав полученный график, можно сделать вывод, что 81 % нарушений на электрифицированном железнодорожном транспорте приходится на два вида – захлест контактного провода и обрыв струны.

Нарушение габарита при обрыве струны обусловлено поломкой струновых зажимов для несущего троса, который, как правило, состоит из двух щек, соединенных стяжным болтом, поэтому необходима модернизация струнового зажима, которая позволит уменьшить нарушения по причине обрыва струны.

Захлест контактного провода чаще всего возникает по двум основным причинам:

#### 1. Ветровые воздействия.

Однако этот параметр учитывают при проектировании и анализе максимального ветра в данном ветровом районе за последние 25 лет, а если произошли климатические изменения и усилились ветровые нагрузки, необходимо предусматривать ветроустойчивую контактную подвеску.

#### 2. Разрегулировка зигзага у опоры, связанная с точностью установки и контроля поддерживающих и фиксирующих конструкции контактной сети.

Наличие слабых грунтов в местах установок опор контактной сети с совокупностью влияния

аэродинамического потока воздушных масс и вибродинамического воздействия движущих поездов вносит свой вклад в изменение угла наклона опор, что, в свою очередь, приводит к разрегулировке контактной подвески и влияет на качество токоотдачи [5].

Особенностью электрифицированных участков Узбекистана является то, что даже на скоростных магистралях в основном применяются железобетонные опоры с частично напряженной арматурой, установленные на фундаментах. Данное решение было принято на основании того, что на территории Республики Узбекистан не имеется больших запасов железной руды и нет запасов качественного каменного угля (антрацита), а выпускаемый заводами металл в основной массе состоит из вторичного сырья. Такой металл не соответствует нормам, необходимым для изготовления металлических опор [1]. Приобретение металлических изделий иностранного производства экономически не обоснованно, так как это увеличивает процесс окупаемости контактной сети и удорожает оплату перевозок по электрифицированным железным дорогам. На начало 2020 г. в эксплуатации Узбекских железных дорог имелось около 56 тыс. опор (рис. 2).

Железобетонные опоры в сравнении с металлическими более экономически выгодные, тем более что в Узбекистане имеется сырье для их изготовле-

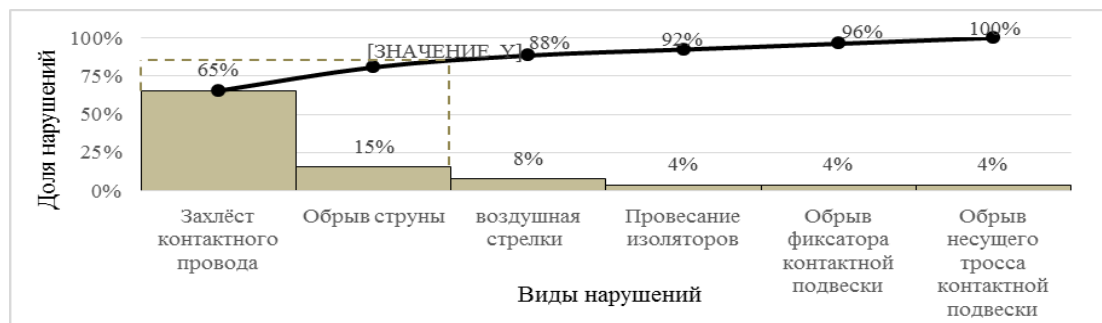


Рис. 1. Анализ нарушений контактной сети на основе теории Парето  
Fig. 1. Analysis of the catenary faults based on the Pareto theory

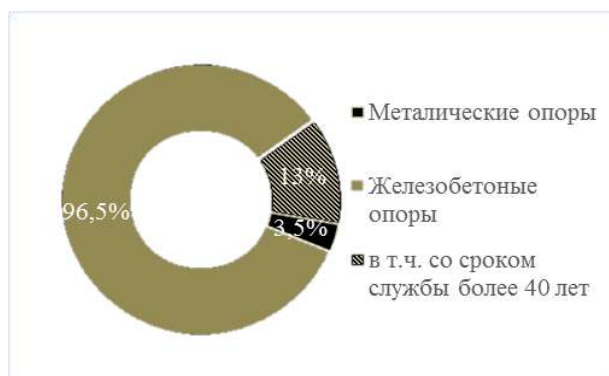


Рис. 2. Статистический анализ опор в эксплуатации АО «Узбекстон темир йуллари»  
Fig. 2. Statistical analysis of supports in the operation of “Uzbek Railways” ОАО

ния, и налажен выпуск опор с частично напряженной арматурой собственными силами. Однако применение железобетонных опор в условиях эксплуатации их на дорогах смещенного типа, где проезжают как тяжеловесные поезда, так и скоростные, и высокоскоростные электроподвижные составы (ЭПС), предъявляет повышенные требования к надежности [6].

В связи с этим встает вопрос о создании системы своевременного диагностирования контроля технического состояния опор на протяжении всего жизненного цикла и необходимости прогнозирования остаточного ресурса эксплуатируемых опор [7, 8].

### **Краткий обзор существующих способов измерения угла наклона опор контактной сети**

Имеется несколько разработок по определению угла наклона опор. Одна из них – патент [9], включающий в себя строительный уровень, на который устанавливается веб-камера, соединенная с компьютером. Причем имеется два варианта использования данного устройства. В первом случае веб-камера размещается на строительном уровне с фокусированием на краю направляющей, находящейся на нулевой отметке линейки. Во втором случае веб-камера размещается таким образом, чтобы горизонтальный пузырьковый уровень полностью присутствовал в кадре. Более подробно описание устройства изложено в диссертации А.А. Ковалева [10].

Известна система непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта [11], состоящая из датчиков физических параметров контактной подвески, блока сбора информации, блока обработки информации, блока оповещения персонала, блока бесперебойного питания, одной из задач которого является диагностирование опор контактной сети при помощи установки на каждую опору вибрационного датчика (инклинометра). Такой датчик определяет динамическое воздействие на опору контактной сети и изменение угла наклона, что позволяет непрерывно контролировать угол наклона опоры. Система мониторинга состояния контактной сети подробно описана в работах [11–13].

Также разработан способ контроля угла наклона опор контактной сети железных дорог [14], состоящий из штатива с уровнем, лазерного дальномера и мобильного электронного устройства со специальной программой, содержащей все основные параметры опор различных марок и их поправочные коэффициенты, которые уменьшают влияние конусности стойки железобетонных опор на точность измерений. Измерение производится со стороны рельсового пути. На штативе установлен лазерный дальномер, с которого измеряется расстояния до опоры с двух уровней поочередно. По разности этих двух расстояний и определяется угол наклона с учетом коэффициента

конусности опоры. О данном способе измерения угла подробно излагается в статьях [15, 16].

Приведенные системы для измерения угла наклона опор обладают рядом недостатков:

В устройстве [9] – ручной способ обработки результатов по видеоизображению, а использование веб-камеры существенно уменьшает точность измерения.

В системе непрерывного мониторинга [11] недостатком является наличие большого количества датчиков, установленных по всему анкерному участку контактной сети, которые необходимо обслуживать.

В способе [14] – ручной способ измерения, длительность подготовительных работ к каждому измерению, а также отсутствие возможности определения наклона опор вдоль железнодорожного пути.

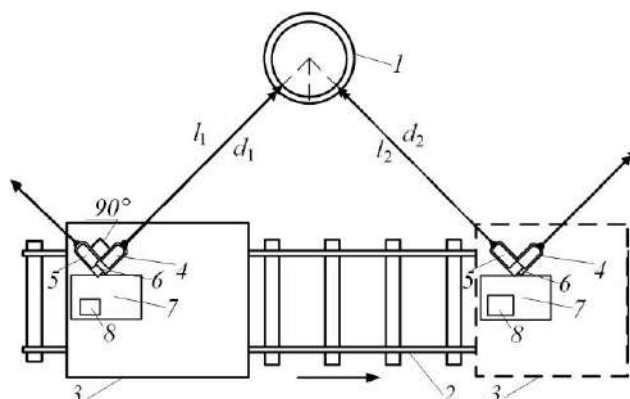
Нами предлагается система определения наклона опор во всех направлениях относительно пути и увеличение быстродействия процесса измерения угла наклона опор.

### **Способ измерения угла наклона опор контактной сети**

Поставленная задача решается тем, что в способ, в котором используется лазерный дальномер, штатив и мобильное электронное устройство, добавлено три дальномера, штатив дополнен гироскопом, датчиками позиционирования, а мобильное электронное устройство – блоком передачи данных. Измерение наклона опоры осуществляется в двух перпендикулярных плоскостях при помощи двух пар лазерных дальномеров, расположенных под углом  $90^\circ$  между парами,  $45^\circ$  по отношению к оси пути в горизонтальной плоскости и  $30^\circ$  между собой в вертикальной плоскости, установленных на подвижной железнодорожной единице. Замеры производятся в движении (рис. 3, 4).

В каждой плоскости измеряется расстояние до точек опоры. Измерение осуществляется с помощью лазерных дальномеров, установленных на штативе с гироскопом. Первые датчики в каждой паре измеряют расстояние перпендикулярно опоре, вторые – под углом  $30^\circ$  вверх по отношению к первым. Угол  $30^\circ$  выбран из соображения, что при габарите опор более 4,2 м расстоянию между точками замера не будет доходить до нижнего узла крепления, фиксирующего или поддерживающего конструкции контактной подвески, при меньшем угле точность измерения уменьшается.

При помощи мобильного электронного устройства, где программой в образующемся треугольнике ABC (рис. 4) рассчитываются неизвестные углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  каждого замера, по ним определяется максимальный угол отклонения железобетонной опоры  $\beta$  и сравнивается с нормативным значением. Если  $\beta$  не превышает  $3^\circ$ , то опора пригодна для эксплуатации.

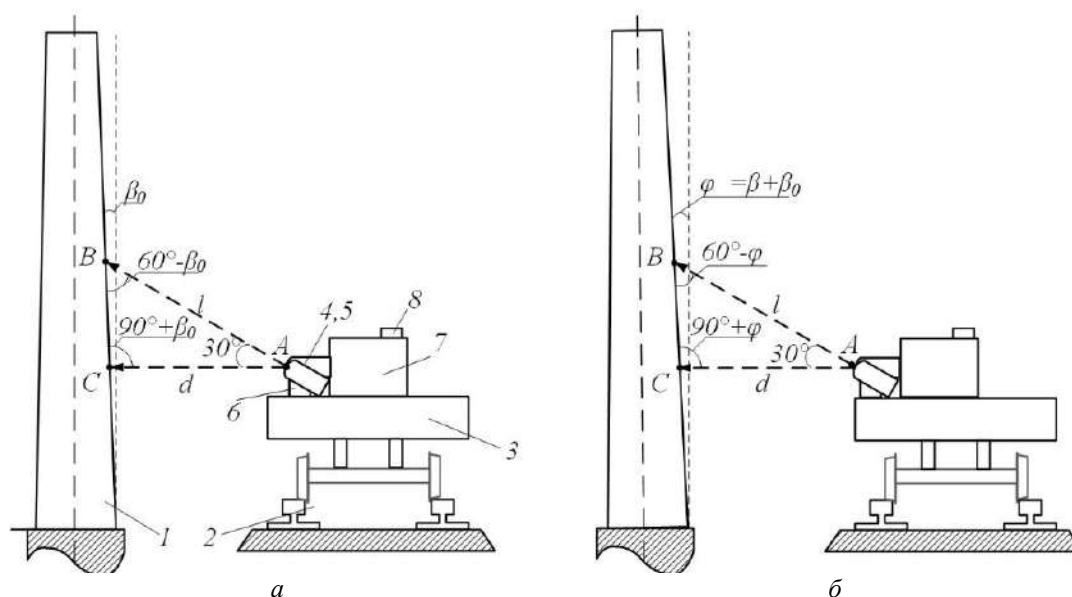


**Рис. 3.** Схема измерений наклона железобетонных опор контактной сети относительно железной дороги в горизонтальной плоскости:

1 – железобетонная опора; 2 – железнодорожный путь; 3 – самоходная единица; 4, 5 – соответственно первая и вторая пара измеряемых лазерных дальномеров; 6 – штатив с гироскопом; 7 – мобильное электронное устройство; 8 – датчики позиционирования

**Fig. 3.** Scheme of measuring the slope of reinforced concrete supports of the catenary relative to the railway in the horizontal plane:

1 – reinforced concrete support; 2 – railway track; 3 – self-propelled unit; 4, 5 – respectively, the first and second pair of measured laser rangefinders; 6 – a tripod with a gyroscope; 7 – mobile electronic device; 8 – positioning sensors



**Рис. 4.** Схема измерений наклона железобетонных опор контактной сети в продольной плоскости:

*a* – правильное положение опоры; *b* – опора с наклоном на угол  $\beta$

**Fig. 4.** Scheme of measurements of the slope of reinforced concrete supports of the catenary in the longitudinal plane:

*a* – the correct position of the support; *b* – the support with an angle of inclination  $\beta$

При превышении  $\beta$  в любой плоскости более чем на  $3^\circ$  полученные датчиком позиционирования координаты опоры передаются обслуживающему персоналу для проведения мероприятий по выправке опор. Алгоритм расчета выполнен таким образом, что может определить уклон опоры в любую сторо-

ну на любой угол. Данные по углам отклонения всех опор сохраняются в их электронном паспорте.

При определении угла наклона опор таким способом влияние конусности железобетонных стоек опор на точность определения наклона отсутствует, так как в расчетах используется угол конусности, который определяется по формуле (1) (рис. 5).

$$\beta_0 = \arctg\left(\frac{D-d}{2 \cdot L}\right) \quad (1)$$

Основные размеры железобетонных стоек опор контактных сетей типа СС, применяемых на железных дорогах Республики Узбекистан, представлены в (табл.). Из расчета видно, что угол конусности одинаков для всех марок железобетонных опор и примерно равен  $\beta_0 \approx 0,425^\circ$ . Тем самым расчет облегчается, а процесс измерения может осуществляться в движении.

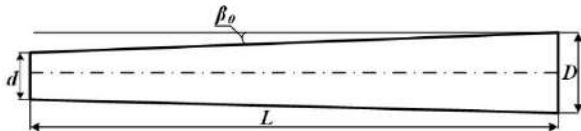


Рис. 5. Габариты железобетонной конической стойки типа СС

Fig. 5. Dimensions of a reinforced concrete conical pole of the SS type

Далее представлен упрощенный алгоритм обработки полученных данных с измерительных датчиков для определения максимального угла отклонения, сравнения его с допустимыми нормами и, в случае отклонения от норм, передачи обслуживающей организации для принятия решения (рис. 6).

### Заключение

Проведенный анализ повреждений токоприемников на основе теории Парето показал, что более 80 % всех случаев повреждений связаны с захлестом контактного провода и обрывом струн по вине струновых зажимов. В связи с этим встал вопрос об усовершенствовании струновых зажимов, исключающих падение струн и нарушение габарита, а также преобразовании системы мониторинга технического состояния опор с применением современного диагностического устройства.

Авторами разработана мобильная система контроля угла наклона опор с использованием современных технических средств – лазерных дальноте-

Параметры железобетонных стоек типа СС  
Parameters of reinforced concrete poles of the SS type

Марка железобетонной стойки	СС 104.7	СС 108.7	СС 128.7	СС 136.7	СС 136.7
Длина $L$ , мм	10 400	10 800	12 800	13 600	14 600
Диаметр вершины $d$ , мм	290	290	290	290	290
Диаметр в комле $D$ , мм	445	450	480	492	508
Угол конусности $\beta_0$	0,427°	0,424°	0,425°	0,425°	0,428°

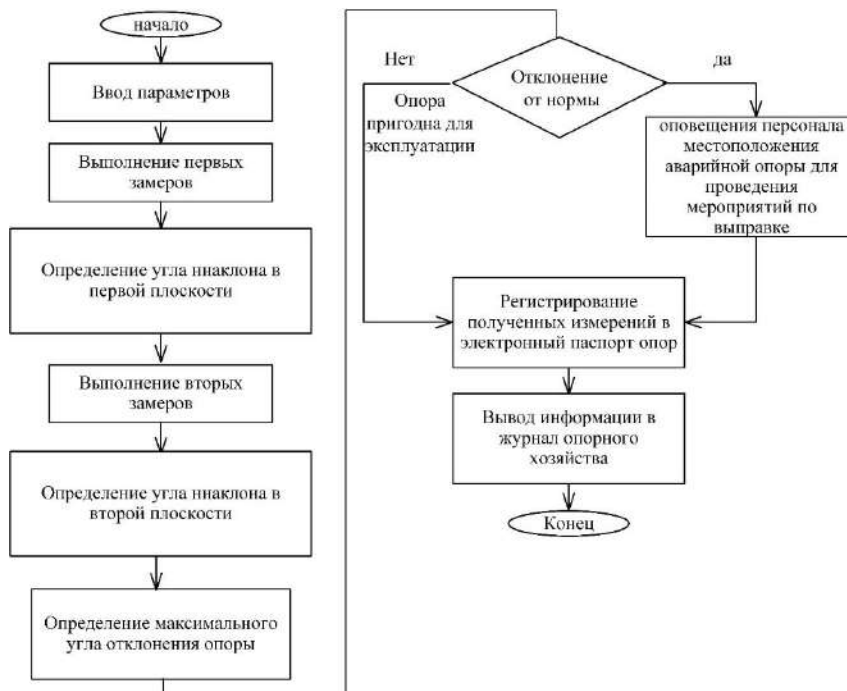


Рис. 6. Упрощенный алгоритм обработки полученных данных

Fig. 6. Simplified algorithm for processing the received data

ров, мобильных электронных устройств и алгоритма выполнения вычислений.

Благодаря использованию двух пар лазерных дальнометров предлагаемая система контроля позволяет определить наклон железобетонных опор в любую сторону в режиме движения и увеличить скорость определения наклона за счет использования

упрощенного вычислительного алгоритма обработки результатов измерения. Данная функция может также применяться для контроля точности монтажа железобетонных опор и отклонения от габарита при новом строительстве. На данный способ измерения угла наклона железобетонных опор подана заявка на патент.

### Список литературы

1. Бадретдинов Т.Н. Проблемы эксплуатации электрифицированных железных дорог на примере Узбекистана // *Universum: технические науки*. 2020. № 9-2 (78). С. 103–105.
2. Иванов В.А., Кудряшов Е.В. Контактная сеть КС-200: история, особенности, перспективы // *Локомотив*. 2013. № 6 (678). С. 38–40.
3. Assessment and prediction of the quality of the contact network under high-speed motion of electric transport / S.F. Amirov, I.N. Bayanov, K.X. Turdibekov et al. // *Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems*. 2020. Vol. 12. Special Issue-02. P. 160–165.
4. Галкин А.Г., Ковалев А.А., Микава А.В. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок // *Изв. Транссиба*. 2018. № 4 (36). С. 69–75.
5. Аксенов Н.А. Оценка возникновения риска отказа участка контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2015. № 4 (18). С. 57–61.
6. Окунев А.В., Галкин А.Г., Ковалев А.А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // *Изв. Транссиба*. 2019. № 2 (38). С. 82–90.
7. Galkin A.G., Kovalev A., Okunev A.V. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. T. 1115. P. 693–702.
8. Устройство для измерения угла наклона оси опоры контактной сети (варианты) : пат. 2340476 Рос. Федерация / А.А. Ковалев, А.Г. Галкин. № 2007125430/11 ; заявл. 05.07.2007 ; опубл. 10.12.2008
9. Ковалев А.А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 142 с.
10. Система и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта : пат. 2701887 Рос. Федерация / Д.В. Ефанов, В.А. Гросс, А.М. Романчиков и др. № 2018129315 ; заявл. 10.08.2018 ; опубл. 02.10.2019.
11. Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети / Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, Д.В. Седых // *Транспорт Урала*. 2017. № 2 (53). С. 37–41.
12. Permanent monitoring systems of the contact-wire of railroad catenary: the main tasks of implementation / D.V. Efanov, G.V. Osadchy, D.V. Barch et al. // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884442.
13. Способ контроля угла наклона опор контактной сети железных дорог : пат. 2660195 / Н.А. Аксёнов, А.А. Ковалев. № 2017116774 ; заявл. 12.05.2017 ; опубл. 05.07.2018.
14. Аксенов Н.А., Ковалев А.А. Разработка прибора по контролю установочных параметров опоры контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2017. № 4 (26). С. 49–53.
15. Аксенов Н.А. Современные способы определения степени разрегулировки опор контактной сети // *Инновационный транспорт*. 2016. № 4 (22). С. 48–51.

### References

1. Badretdinov T.N. Problemy ekspluatatsii elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na primere Uzbekistana [Problems of operation of electrified railways by the example of Uzbekistan]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2020. No. 9-2 (78). Pp. 103–105.
2. Ivanov V.A., Kudryashov Ye.V. Kontaktnaya set' KS-200: istoriya, osobennosti, perspektivi [KS-200 catenary: history, features, prospects]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013. No. 6 (678). Pp. 38–40.
3. Amirov S.F., Bayanov I.N., Turdibekov K.X., Abdullaeva R. Assessment and prediction of the quality of the contact network under high-speed motion of electric transport. *Jour. of adv. research in dynamical & control systems*, Vol. 12, Special issue-02, 2020. Pp. 160–165.
4. Galkin A.G., Kovalyov A.A., Mikava A.V. Vliyanie ugla naklona opory na vysotu podvesa kontaktnogo provoda otnositel'no urovnya golovki dlya skorostnykh i vysokoskorostnykh kontaktnykh podvesok [Influence of the angle of inclination of the support on the height of the suspension of the contact wire relative to the head level for high-speed and high-speed contact suspensions]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway], 2018. No. 4 (36). Pp. 69–75.
5. Aksyonov N.A. Otsenka vozniknoveniya riska otказа uchastka kontaktnoi seti [Assessment of the risk of failure of the catenary section]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2015. No. 4 (18). Pp. 57–61.
6. Okunev A.V., Galkin A.G., Kovalyov A.A. Opredelenie predel'nykh sostoyanii opor kontaktnoi seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushchei sposobnosti [The definition of the limit states of catenary supports on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capacity]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway], 2019. No. 2 (38). Pp. 82–90.

7. Galkin A.G., Kovalyov A., Okunev A.V. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 693–702.

8. Kovalyov A.A., Galkin A.G. *Ustroistvo dlya izmereniya ugla naklona osi opory kontaktnoi seti (varianty)*. [A device for measuring the inclination angle of the contact system support axis (options)] Patent for invention RU 2340476 C1, December 10, 2008. Application No. 2007125430/11 dated July 05, 2007.

9. Kovalyov A.A. *Formirovanie upravlyayushhikh vozdeistvii na kontaktnoi seti s uchytom protsessa razregulirovok opor*: dis. kand. techn. nauk: 05.22.07 [Formation of management actions in the catenary taking into account the process of misalignment of supports: a Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.07. Ural state transport university. Ekaterinburg, 2008.

10. Efanov D.V., Gross V.A., Romanchikov A.M., Bolotskii D.N., Vasil'ev A.Yu. *Sistema i sposob nepreryvnogo monitoringa sostoyaniya kontaktnoi seti relsovogo transporta* [The system and method of continuous monitoring of the state of the rail transport catenary]. Patent for invention RU 2701887 C1, October 02, 2019. Application No. 2018129315 dated August 10, 2018.

11. Efanov D.V., Osadchii G.V., Sedykh D.V., Barch D.V. Organizatsiya nepreryvnogo monitoringa uglov naklona opor zheleznodorozhnoi kontaktnoi seti [Organization of continuous monitoring of tilt angles of railway catenary supports]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017. No. 2 (53). Pp. 37–41.

12. Efanov D.V., Osadchii G.V., Barch D.V., Belyi A.A. Permanent monitoring systems of the contact-wire of railroad catenary: the main tasks of implementation. *2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2019*, 2019. Pp. 8884442.

13. Aksyonov N.A., Kovalyov A.A. *Sposob kontrolya ugla naklona opor kontaktnoi seti zheleznykh dorog* [A method of controlling the inclination angle of railway catenary supports]. Patent for invention RU 2660195 C1, July 05, 2018. zayavka No. 2017116774 dated May 12, 2017.

14. Aksyonov N.A., Kovalyov A.A. *Razrabotka pribora po kontrolyu ustanovochnykh parametrov opory kontaktnoi seti* [Development of a device for monitoring the installation parameters of the catenary supports]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2017. No. 4 (26). Pp. 49–53.

15. Aksyonov N.A. *Sovremennye sposoby opredeleniya stepeni razregulirovki opor kontaktnoi seti* [Modern methods of determining the degree of misalignment of catenary supports]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2016. No. 4 (22). Pp. 48–51.

#### Информация об авторах

**Амиров Султан Файзулаевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: amirovsvf@bk.ru

**Бадретдинов Тимур Наильевич** – докторант кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: tim\_bad2107@mail.ru

**Баянов Ильдар Назипович** – докторант, доцент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: ildar-lili@yandex.ru

#### Information about the authors

**Sultan F. Amirov** – Doctor of Engineering Science, Professor, head of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent. e-mail: amirovsvf@bk.ru

**Timur N. Badretdinov** – Doctoral student of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: tim\_bad2107@mail.ru

**Ildar N. Bayanov** – Doctoral student, acting Associate Professor of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: ildar-lili@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).145-153

УДК 621.396.96

## Анализ влияния траектории движения динамического управляемого объекта на точность определения навигационных параметров

**В. В. Ерохин<sup>1</sup>**, **В. А. Караченцев<sup>2</sup>**, **Н. П. Малисов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации,

г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Ww\_erohin@mail.ru

#### Резюме

Для реализации требований международной организации гражданской авиации по увеличению пропускной способности и эффективности использования воздушного пространства разработана стратегия зональной навигации и ее составляющая – свободная маршрутизация полетов. Целью исследований является анализ влияния траектории динамического управляемого объекта на точность определения координат при зональной навигации и свободной маршрутизации полетов. В статье проведен анализ влияния выбранного маршрута полета на точность определения навигационных параметров в рамках использования алгоритма расширенного фильтра Калмана. Показано, что существует однозначная зависимость радиальной погрешности, геометрического фактора и меры наблюдаемости от угла поворота траектории. На основе проведенного анализа предложено использовать меру наблюдаемости для формирования критерия оптимизации при реализации зональной навигации. Методами имитационного статистического моделирования подтверждена однозначная зависимость между геометрическим фактором, мерой наблюдаемости и следом ковариационной матрицы оши-