

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОСТАНОВКИ ПУТИ В ПРОЕКТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САУ-3D

Сергей Анатольевич Комягин

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, аспирант, тел. (923)777-35-44, e-mail: skomyagin@mail.ru

В статье рассмотрены проблемы постановки железнодорожного пути в проектное положение. Определены недостатки существующих систем автоматизированного управления строительной техники. Рассмотрена технология постановки пути в проектное положение системами автоматизированного управления на базе глобальных навигационных спутниковых систем, техническая реализация системы. Приведены проблемы применения ГИС-технологий при создании проектов ремонта, строительстве (ремонте) и эксплуатационных работах, в частности отсутствие электронных проектов для САУ на базе ГНСС. Приведен принцип актуализации проектных данных, а именно геометрических параметров, перед производством работ и создании электронных проектов. Рассмотрен состав электронного проекта для САУ-3D выправочной техники. Выполнена оценка точности постановки пути в проектное положение по геометрическим параметрам и приведено сравнение полученных результатов с требованиями нормативной документации.

Ключевые слова: ГИС-технологии, ремонты пути, геометрические параметры пути.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF STATEMENT OF THE WAY TO THE PROJECT STATUS WITH ACS-3D

Sergey A. Komyagin

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Ph. D. Student, phone: (923)777-35-44, e-mail: skomyagin@mail.ru

The article deals with the problem of setting the railway track in the design position. Identified shortcomings of existing systems of automated management of construction machinery. The technology of setting the path in the design position of the automated control systems based on global navigation satellite systems, the technical implementation of the system. Presents the problem of the use of technologies based on geoinformation system in creating repair projects, construction (repairs) and operational work, particularly the lack of electronic projects for the automated control systems based on global navigation satellite systems. Is a principle of updating project data, namely the geometrical parameters, before the production of works and the creation of electronic projects. Considered part of the electronic project for ACS-3D straightening techniques. The evaluation of the accuracy of staging the way to the design position of the geometric parameters and compares the results with the requirements of regulatory documents.

Key words: technologies based on geoinformation system, location and geometrics, repair of rail track.

Введение

Железнодорожная инфраструктура – это сложная техническая система. Одной из составляющей ее является железнодорожный путь, по которому осуществляется непосредственно движение подвижного состава.

Климатические особенности, конструкция железнодорожного пути, условия эксплуатации, грузонапряженность, интенсивность движения, а также непосредственно динамическое взаимодействие в системе «колесо – рельс» – все эти факторы влияют на состояние железнодорожного пути. В процессе эксплуатации, находясь под динамическими нагрузками от подвижного состава, положение пути начинается смещаться от первоначального положения. Появляются отступления от норм содержания железнодорожного пути. Эти отступления могут относиться как к незначительным (I степени), при которых только начинают зарождаться расстройства пути, так и к более серьезным (отступления IV степени), вплоть до закрытия участка пути. Изменяются положение пути в плане и профиле, технические параметры пути, геометрия рельсовой колеи, вследствие чего ухудшается плавность хода и безопасность движения поездов. Вводятся ограничения скоростного режима, вследствие чего уменьшается пропускная способность пути. Увеличиваются затраты на текущее содержание пути. В результате чего все перечисленные факторы относятся к основным или дополнительным критериям для назначения ремонта на данный участок пути.

Проект ремонта пути составляется специализированными организациями. Он содержит все технические решения по устройству и положению железнодорожного пути, при котором будет обеспечена плавность и безопасность движения поездов с максимальными скоростями, при которых затраты на текущее содержание пути будут минимальны.

Основное требование к ремонтам пути – это постановка пути в проектное положение, исполнение всех решений, предусмотренных проектом, в минимальный интервал времени, без снижения качества выполненных работ.

Методы и материалы

Постановка пути в проектное пространственное положение в плане, в продольном профиле и по уровню при различных видах ремонта, а также текущем содержании пути выполняется выправочно-подбивочно-отделочными и рихтовочными машинами, такими как ВПР, ВПРС, Дуомат, ЭЛБ, Р-2000, ВПО. Все эти комплексы позволяют выправлять путь в трех координатах (в плане, в продольном профиле и по уровню). Конструкция машин во многом разнообразна, но при этом принцип действия используемых систем имеет много общего.

Все системы для выправки пути в плане и продольном профиле делятся на два вида: системы, работающие по методу сглаживания (уменьшение) величины остаточной неровности встречающейся в пути; системы, которые выполняют постановку пути в фиксированные (проектные) отметки в плане и по высоте в заданную ось. Первый вид систем, более прост и универсален в использовании, но существенный недостаток это, во-первых, невозможность выправлять длинные неровности без выполнения геодезической съемки, а во-вторых, отсутствие неразрывной связи с проектом в процессе работы.

В Сибирском государственном университете путей сообщения в научно-инженерном дорожном центре в лаборатории «Диагностика дорожных одежд

и земляного полотна» разработана технология выправки железнодорожного пути по координатному методу, которая относится ко второму виду выправочных систем.

Система автоматизированного управления выправкой пути САУ-3D, реализована на путевых строительных машинах типа ЭЛБ. Процесс отработки технологии и реализации координатного метода постановки пути в проектное положение происходил при непосредственном сотрудничестве с Западно-Сибирской железной дороги.

Система автоматизированного управления выправкой пути САУ-3D на базе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) была реализована в двух видах. Универсальный вариант САУ-3D, предполагает постановку в проектное положение по высокоточной цифровой модели пути. Данная система применима как на однопутных участках пути на электрифицированных и не электрифицированных линиях, так и на двухпутных железнодорожных магистралях. Данная технология не требует трудоемких геодезических работ, но предъявляются высокие требования к качеству электронного проекта для непосредственной работы машины по данному методу.

Второй вариант исполнения данной системы САУ-3D на базе ГНСС реализован с использованием электронной рейки [1]. Принципиальная схема реализации данной технологии представлена на рис. 1.

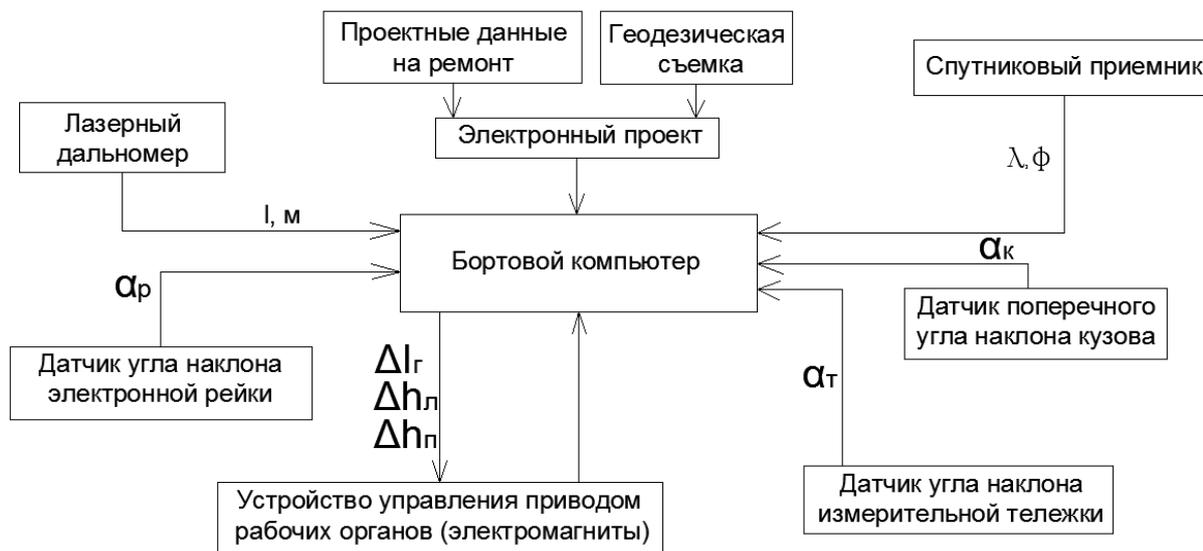


Рис. 1. Принципиальная схема работы системы САУ-3D на базе ГНСС с использованием электронной рейки

Порядок реализации данной технологии состоит из нескольких этапов. На крыше кузова машины ЭЛБ устанавливается спутниковая антенна непосредственно над рабочими механизмами машины, одночастотный приемник в абсолютном режиме определяет местоположение машины (рабочих органов маши-

ны) с точностью до 1 м. Система датчиков углов наклона расположенных на кузове машины, на измерительной тележке и электронной рейки считывают информацию и передают в бортовой компьютер кабину оператора (рис. 2). Туда же поступает и информация от лазерного дальномера, установленного на электронной рейке и определяющее расстояние до внешней боковой грани рельса по соседнему опорному пути. Определяется пространственное положение оси пути, а также уровень и сравнивается с проектным его положением, определяются величины сдвижек и на рабочие органы отправляются рабочие команды.

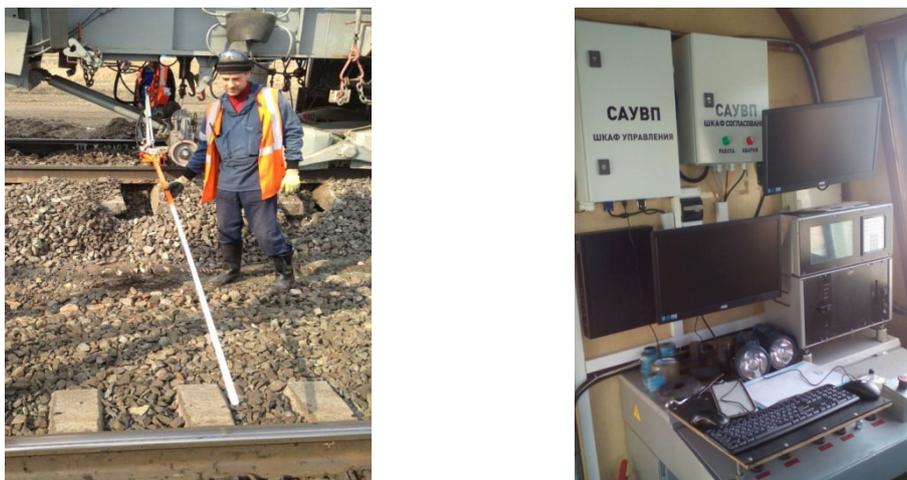


Рис. 2. Реализованная система САУ-3D, с использованием электронной рейки

Для оценки точности постановки пути в проектное положение выбрано два опытных участка пути, на которых работали ЭЛБ по данной технологии с использованием САУ-3D на базе ГНСС с электронной рейкой. Из схемы, представленной на рис. 1, видно, что входными данными для работы программы по выправке пути TrackAlignment, содержащими проектные данные, является электронный проект.

Электронный проект состоит из оцифрованных данных, на основе бумажного проекта на ремонт пути, полученного от проектной организации и геодезической съемки опор контактной сети (ОКС) с использованием спутникового оборудования. Съемка ОКС выполняется либо в абсолютном, либо в относительном режиме. Координаты ОКС экспортируются в системе WGS-84. Этот этап необходим для перехода из глобальной системы координат WGS-84 в линейную систему Км + Пк + М, в котором выполнен проект на ремонт. Данный подход позволяет однозначно определять местоположение рабочих органов ЭЛБ при независимых многократных рабочих проходах и использовать проектные решения применимые именно к конкретному сечению железнодорожного пути.

В состав проектных данных необходимых для электронного проекта входят: номер ОКС, габарит ОКС, величина междупутья, точки начала и конца переходных и круговых кривых, возвышение наружного рельса в кривых, проект-

ная отметка ремонтируемого пути, а также существующая отметка опорного пути. Фрагмент электронного проекта представлен в табл. 1.

Таблица 1

Электронный проект для САУ-3D на базе ГНСС
с использованием электронной рейки

x_ск42	y_ск42	h_ск42	Расстояние	d1	d2	d3	d4	Код	L_проект_путь	L_проект_иссо	Н
9588.2	7460.3	514.88	171471.54		0	0	0	1	0	7.01	514.91
9588.2	7460.3	514.88	171471.54	77	15	0	0	90	5.47	7.01	514.91
9588.6	7461.3	514.88	171472.56		15	0	0	0	5.46	7.01	514.91
9588.9	7462.3	514.88	171473.57		16	0	0	0	5.46	7.01	514.91
9589.2	7463.3	514.88	171474.59		17	0	0	0	5.46	7.01	514.91
9589.6	7464.3	514.89	171475.61		18	0	0	0	5.45	7.01	514.91
9589.9	7465.3	514.89	171476.62		19	0	0	0	5.45	7.01	514.91
9590.2	7466.3	514.89	171477.64		20	0	0	0	5.45	7.01	514.91

Для комплексного подхода к оценке точности постановки пути ЭЛБ по данной технологии, необходимо рассмотреть технологический процесс ремонта пути. ЭЛБ выполняет подъемку и рихтовку железнодорожного пути, при том, что после подъемки, балласт под постелью шпалы не уплотнен и не стабилизирован, поэтому после работы ЭЛБ в технологическую цепочку включены динамический стабилизатор пути, выправочно-подбивочно-рихтовочные машины. Следовательно, высотное положение и положение пути по уровню меняется. Исходя из этого, электронный проект содержит данные по подъемке и уровню, но эти параметры зачастую не являются контрольными, а служат вспомогательными для операторов машины в процессе ремонта. Контрольным параметром является положение пути в плане, оценивая его по величинам междупутья и габаритов до ОКС (рис. 3). До начала выбранных работ был выполнен анализ эпюры рихтовок на выбранные экспериментальные участки пути.

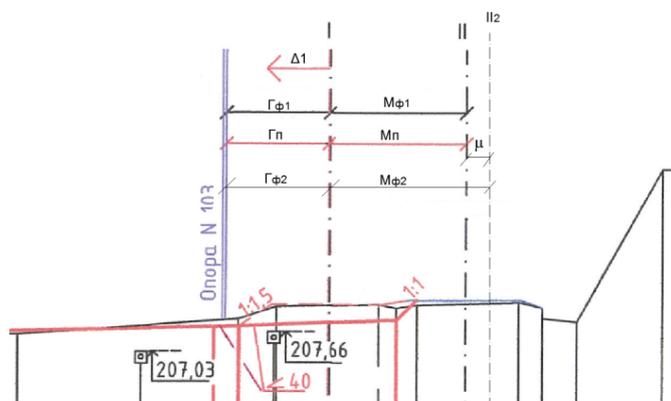


Рис. 3. Схема расположения пути в плане по параметрам габарита и междупутья

На выбранных опытных участках пути проверялось выполнение условия:

$$\Gamma_{\text{п}} + M_{\text{п}} = \Gamma_{\text{ф1}} + M_{\text{ф1}}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{п}}$, $M_{\text{п}}$ – соответственно проектная величина габарита до ОКС и междупутья, м;

$\Gamma_{\text{ф1}}$, $M_{\text{ф1}}$ – соответственно фактическая величина габарита до ОКС и междупутья на момент геодезических изысканий для составления проекта ремонта, м.

С момента геодезических изысканий и составления проекта ремонта (модернизации) железнодорожного пути проходит определенное время. В это время опорный второй путь также находится под действием динамических нагрузок, и выполняются работы по текущему содержанию. Вследствие этих факторов положение оси опорного пути может смещаться, тем самым необходимо внести поправку на это смещение μ при неизменной величине проектного габарита до ОКС и выполнить следующее условие:

$$\Gamma_{\text{ф2}} + M_{\text{ф2}} = \Gamma_{\text{п}} + M_{\text{п}} \pm \mu, \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{ф2}}$, $M_{\text{ф2}}$ – соответственно фактическая величина габарита до ОКС и междупутья перед и после проведения ремонта, м;

μ – величина поправки к проектному междупутью, м.

Выполнение условия (2) обеспечивает актуализацию проекта в плане.

В ходе реконструкции (модернизации) пути на участке С – М выбраны три участка пути и участок на перегоне В – Б. После крайнего рабочего прохода ЭЛБ, осуществляющего выправку пути по САУ-3D, выполнены контрольные промеры габаритов ОКС и величины междупутья. Контрольные промеры выполнялись в створах опор контактной сети, с использованием лазерной рулетки Disto A8, с приборной точностью $\pm 0,5$ мм. Фрагмент выполненных промеров представлен в табл. 2. Согласно [2] ширина междупутья определяется как расстояние между осями смежных путей, измеряемое перпендикулярно осям. При этом согласно правилам технической эксплуатации железных дорог российской федерации ось железнодорожного пути – линия, проходящая в плоскости поверхности катания рельсов на одинаковом расстоянии от их осей симметрии [3].

Исходя из определения физически ось железнодорожного пути на новых материалах совпадает с серединой ширины колеи железнодорожного пути. При этом на существующих линиях в кривых, под действием сил инерции центробежного ускорения наблюдается боковой износ наружного рельса. Вследствие чего ось пути не будет совпадать с серединой ширины колеи и будет смещена в сторону внутреннего рельса на величину половины бокового износа наружного рельса. Во-вторых, номинальная ширина колеи на существующих линиях согласно [3] составляет 1 520 мм и имеет допуски на уширение +8 мм и сужение – 4 мм. При минимальных и максимальных величинах 1 512 и 1 548 мм, при том что в кривых с радиусом менее 350 номинальная ширина колеи увеличивается до 1 530 мм.

Контрольные промеры габаритов ОКС и величины междупутья
на участках С – М и В – Б

№ опоры	ПК	Проектные значения, м		Фактические значения, м		Разница (пр. – факт.), м	
		габарит	между-путье	габарит	между-путье	габарит	между-путье
Участок пути С – М							
235	80186.5	3.11	4.18	3.12	4.2	-0.01	-0.02
237	80250.0	3.14	4.28	3.14	4.29	0	-0.01
239	80314.5	3.36	4.46	3.38	4.47	-0.02	-0.01
241	80374.0	3.44	4.37	3.47	4.38	-0.03	-0.01
243	80428.1	3.24	4.28	3.26	4.3	-0.02	-0.02
389	85016.9	3.5	4.62	3.51	4.63	-0.01	-0.01
391	85080.7	3.44	4.6	3.46	4.6	-0.02	0
393	85143.3	3.65	4.49	3.69	4.5	-0.04	-0.01
467	87478.8	3.41	4.45	3.4	4.43	0.01	0.02
469	87542.5	3.25	4.43	3.19	4.42	0.06	0.01
471	87606.4	3.23	4.41	3.23	4.41	0	0
467	87478.8	3.41	4.45	3.4	4.43	0.01	0.02
Участок пути Б – В							
389	4403,01	6,03	4,22	6,06	4,23	-0,03	-0,01
393	4519,05	5,79	4,23	5,85	4,23	-0,06	0
395	4583,53	5,79	4,17	5,84	4,18	-0,05	-0,01
бн	4585,86	5,44	4,17	5,43	4,18	0,01	-0,01

С учетом того, что точность проекта по габаритам ОКС и величине междупутья составляет 1 см, а также всех перечисленных факторов, модель и процесс определения величины междупутья идеализируется и определяется по формуле

$$M = l_M + 1,67, \quad (3)$$

где l_M – расстояние между нерабочими гранями рельсов, см;

Константа 1,67 представляет собой сумму двух половин ширины колеи (1 520 мм) и две ширины головки рельса типа Р65 [4] (рис. 4). Такая же модель и алгоритм определения величины междупутья осуществлен в САУ-3D.

Величина междупутья, как было описано выше, определяется перпендикулярно оси пути, а соответственно, в кривых будет перпендикулярно хорде в ее середине. Для исключения ошибки наведения при проведении серии контрольных промеров параметра l_M , выполнялась серия измерений в данном сечении для нахождения $l_M \min$.

Габариты опор контактной сети – расстояние от оси пути до внутренней грани опор на уровне верха головок рельсов (или до внутренней грани фундаментов опор) [2]. Расстояние l_r , определялось в соответствии с рис. 4, во избежание ошибок от ширины колеи ремонтируемого пути.

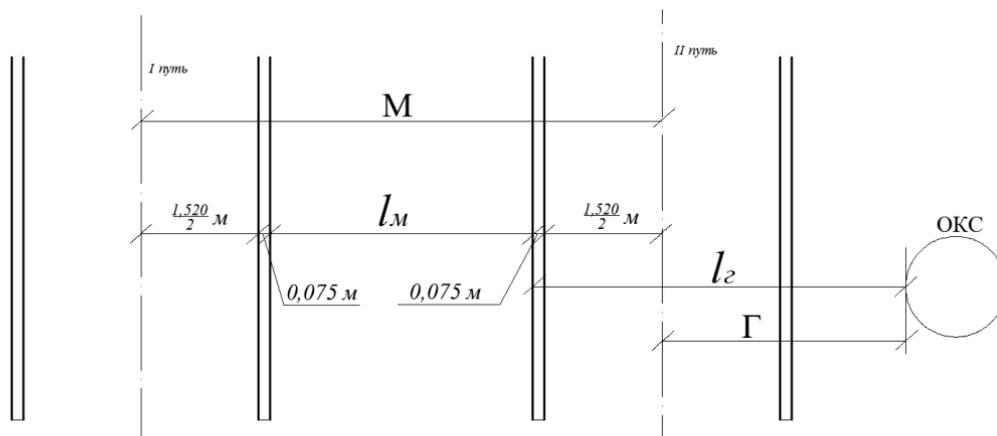


Рис. 4. Схема определения габаритов ОКС и величины междупутья

Проанализировав полученные данные в табл. 2, можно сделать следующие выводы: на ОКС 471 участка пути отклонения по габариту и величине междупутья отсутствуют, а значит, положение пути в плане соответствует проекту, а смещение опорного пути в данном сечении с момента изысканий до момента ремонта не было. В остальных сечениях наблюдается либо одновременное отклонение габарита и величины междупутья от проектного положения в плане с одинаковым знаком, либо разного знака, но разной по модулю величине. Это говорит о том, что выполнение условия (2), сотрудниками технического отдела путевых машинных станций обеспечено не было, тем самым актуализация проекта по выправке пути в плане не выполнена. При этом на точность работы машин, оснащенных САУ-3D, этот факт не влияет. Расчет точности постановки пути в проектное положение в плане осуществлялся только по параметру величины междупутья.

В ходе выполнения контрольных промеров габаритов опор контактной сети и величины междупутья выполнено 90 измерений. Эта величина и составила объем выборки из генеральной совокупности. Так как проводимые измерения выполнялись на разных участках пути, после работ разных машин, оснащенных САУ-3D, то это говорит о репрезентативности выборки.

В ходе обработки результатов контрольных промеров, фрагмент которых представлен в табл. 2, определено, что наибольшая и наименьшая величина абсолютной погрешности постановки пути в проектное положение в плане, составила от -4 до $+4$ см. Размах абсолютной погрешности составляет 8 см. Определена частота и относительная частота появления отклонения величины от проектной. Размах абсолютной погрешности был разбит на интервалы, ширина интервала составила 1 см (табл. 3).

По данным табл. 3 построена гистограмма и полигон распределения абсолютной ошибки постановки пути в проектное положение ЭЛБ с использованием САУ-3D (рис. 5).

Анализ статистических данных по результатам промеров

№ п/п	Абсолютная погрешность Δ_i , м	Частота наблюдения n_i	Относительная частота наблюдения n_i/n	Накопленная частота $n_{i-1} + n_i$
1	-0.04	1	0,01	1
2	-0.03	2	0,02	3
3	-0.02	11	0,12	14
4	-0.01	21	0,23	35
5	0	25	0,28	70
6	0.01	22	0,25	92
7	0.02	5	0,06	97
8	0.03	2	0,02	99
9	0.04	1	0,01	100

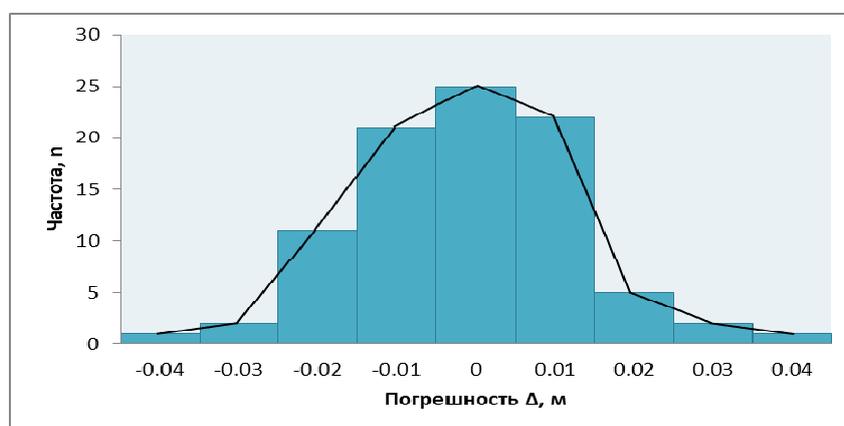


Рис. 5. Гистограмма и полигон распределения абсолютной ошибки

Результаты

Определение средней квадратической ошибки (СКО) постановки пути в проектное положение в плане по данным контрольных измерений выполнялось по формуле Гаусса:

$$m = \sqrt{\frac{\sum[\Delta^2]}{n}}, \quad (4)$$

где Δ – величина абсолютной погрешности, см;
 n – количество контрольных измерений.

Вычисленная по формуле (4) СКО постановки пути в проектное положение в плане составила $\pm 1,4$ см.

Дополнительным параметром оценки точности положения пути в плане после крайнего прохода ЭЛБ, является отклонение среднего радиуса круговой кривой от проектного, %. Для этого были созданы карточки кривых по форме ФП-5, установленной в ОАО «РЖД». Определение геометрических параметров рельсовой колеи выполнено с использованием аппаратно-программного комплекса (АПК) «Профиль-М», который также является запатентованной разработкой СГУПС [5]. Диапазоны измерений и пределы относительных погрешностей АПК при измерении параметров пути указаны в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров, измеряемые АПК «Профиль-М»

Наименование параметра	Значение параметра	
	диапазон измерения	погрешность измерения
Координаты	25 км	$\pm 5\text{ мм} + 1\text{ мм/км}$
Расстояние	25 км	$\pm 0,01\%$
Высота	25 км	$\pm 10\text{ мм} + 1\text{ мм/км}$
Ширина колеи	1 505–1 560 мм	$\pm 2\text{ мм}$
Уровень	0–300 мм	$\pm 2\text{ мм}$
Рихтовка	$\pm 160\text{ мм}$	$\pm 2\text{ мм}$
Просадка	$\pm 50\text{ мм}$	$\pm 2\text{ мм}$

Съемка выполнялась на участках пути С-М, А-А. В табл. 5 приведены фактические и проектные величины среднего радиуса круговой кривой, по результатам работы ЭЛБ, оснащенный САУ-3D.

Таблица 5

Отклонение фактического среднего радиуса круговой кривой от проектного

Номер кривой	Величина среднего радиуса, м		Отклонение от проекта, %
	по проекту	после работы ЭЛБ	
1	2 150	2 166	0,7
2	1 050	1 075	2,4
3	2 120	2 126	0,3
4	815	819	0,5
5	802	806	0,5

По данным табл. 5 видно, что отклонение среднего радиуса круговой кривой от проектного, составляет не более 3 %. Согласно требованиям распоряжения № 75р [6] к условиям приемки и оценки качества выполненных работ, минимальная величина отклонения среднего радиуса круговой кривой от проектного для всех видов ремонта и скоростях движения 161–200 км/ч должна составлять менее 8%. По данному параметру система САУ-3D с электронной рейкой, полностью удовлетворяет требования данного распоряжения.

Заключение

Таким образом, система САУ-3D, установленная на ЭЛБ позволяет уже на этапе постановки пути на щебень выправлять путь в плане на проектное положение. По высотным отметкам и по уровню автоматически выставляют путь в соответствии с ограничениями, принятыми оператором машины или сотрудника техотдела путевой машинной станции, что связано непосредственно с особенностями технологического процесса. На основании проведенных исследований абсолютная погрешность постановки пути в проектное положение в плане с использованием САУ-3D составила ± 4 см. Средняя квадратическая погрешность $\pm 1,4$ см. Отклонение среднего радиуса круговой кривой от проектного, составляет не более 3 %. Данная точность исполнения соответствует всем требованиям нормативных документов.

Большая роль повышения точности исполнения проектного решения машинами ЭЛБ, оснащенными САУ-3D, является актуализация проекта. Актуализированный бумажный проект с внесенными поправками в электронный позволяет максимально точно выправлять путь с постановкой его на проектное планово-высотное положение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков В. В., Пименов А. И., Щербаков И. В., Модестов А. Н., Бунцев И. А., Славкин В. П. Патент № 147033. Российская Федерация, МПК 51 E01 B 29/04. Система для управления выправкой пути. 2014.
2. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений;
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России от 21.12.2010г. № 286. М.: 2011. Приказ Министерства транспорта РФ от 9 февраля 2018 г. № 54 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286».
4. Альбом элементов и конструкций верхнего строения железнодорожного пути. Утв. ЦП ОАО «РЖД» 19.12.2011. – М., 2012.
5. Щербаков В. В., Бунцев И. А., Щербаков И. В. Патент на изобретение 2628541. «Способ определения пространственных координат и параметров рельсового пути и устройство для его осуществления», 2017.
6. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути (утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 №75р).

© С. А. Комягин, 2019