

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

УДК 625.111

П. В. ЖДАНОВИЧ, ведущий инженер НИЛ «Транспортные сооружения», Белорусский государственный университет транспорта; В. П. ЖДАНОВИЧ, кандидат сельскохозяйственных наук, Институт радиобиологии НАН Беларуси; П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; В. В. ЯЛТЫХОВ, кандидат технических наук, Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСОВ КРУГОВЫХ КРИВЫХ И ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ В ИХ ОПРЕДЕЛЕНИИ НА ДЛИНУ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Представлена методика расчета радиусов круговых кривых железнодорожных путей в плане. Сведения о радиусах кривых получают по результатам геодезической съемки железнодорожных путей. Применяют сведения о радиусах при реконструкции и ремонте путей на криволинейных участках, при оценке отклонения фактического положения осей полотна от проектного после окончания строительства или в процессе сдвига при эксплуатации. Определение радиусов существующих железнодорожных путей актуально при исправлении смещений и при износе несущих конструкций путей с целью выправления и приведения их в безопасное рабочее состояние.

Введение. Железнодорожный путь в плане состоит из прямых участков. Очень часто на практике возникает необходимость определения радиусов существующих горизонтальных кривых. Сведения о радиусах и других показателях кривых используют при проектировании ремонтных мероприятий и организации безопасности движения (скоростного режима).

Применяют круговые кривые со следующими радиусами: 4000, 3000, 2000, 1800, 1500, 1200, 1000, 800, 700, 600, 500, 400, 300 и 200 м. Радиус кривой зависит от ряда конкретных технических условий: расчетной скорости движения поездов, уклона местности, габаритов вагонов, вида поездов, длины составов и др. [1–3].

Значения радиусов круговых кривых в процессе эксплуатации путей изменяются вследствие динамических нагрузок со стороны подвижного состава. Определение радиусов криволинейных участков ведется различными методами.

Данная разработка по определению радиусов существующих железнодорожных путей актуальна для исправления смещений и при износе несущих конструкций путей с целью выправления их и приведения в безопасное рабочее состояние.

Объекты исследования. Способы определения и расчета радиусов и дуг горизонтальных круговых участков пути.

Цель исследования. Обоснование выбора методики для определения радиусов закруглений железнодорожных путей.

Задачи исследования:

- выполнить расчет радиусов круговых кривых различными способами;
- дать сравнительную оценку методов определения фактических радиусов и длин дуг кривых железнодорожных путей по данным инструментальной съемки.

Метод исследования. Расчет радиусов закруглений путей различными способами. Оценка влияния погрешности величины радиуса на длину дуги железнодорожного пути.

Научная новизна состоит в оценке методов определения фактических радиусов кривых железнодорожных путей по данным геодезической съемки.

Основная часть. Самым простым и доступным способом определения радиусов закруглений является *метод хорд*. Он выполняется непосредственным измерением геометрических элементов пути (хорда кривой и стрела изгиба). К измерениям привлекаются три исполнителя: двое – с мерной лентой или рулеткой, третий измеряет длину стрелы изгиба линейкой (рисунок 1) [4].



Рисунок 1 – Универсальная схема использования способа хорд

В данном случае радиус кривой, м, определяется по формуле

$$R = \frac{a^2}{8f} \quad (1)$$

Несмотря на то, что описанный метод прост, он ограничен в применении длиной закругления, временем исполнения и количеством изыскателей. Также не исключена погрешность в определении радиуса по причине «угона пути» и от температурных деформаций железнодорожного пути.

Радиус закругления существующих железнодорожных путей также можно определить и другим способом. Его суть основана на вычислении радиуса по известным координатам нескольких съемочных точек закругления. Таких точек должно быть не менее трех, так как в системе уравнений для определения радиуса закругления имеется три неизвестные величины.

Координаты точек по закруглению получают по результатам выполнения измерений электронным тахеометром, либо по результатам спутниковых измерений. На криволинейных участках могут применяться переходные кривые. Последние располагают

по краям основного закругления, и они имеют переменный радиус для плавного нарастания центробежной силы.

При расчете радиуса основного закругления координаты съёмочных точек по переходным кривым должны исключаться. Длины переходных кривых железнодорожных путей, как правило, не превышают 200 м. Радиус переходной кривой не постоянный. Он изменяется от края кривой (там его значение максимально) до значения радиуса R круговой кривой (в точке соединения переходной и круговой кривых).

Координаты съёмочных точек по круговой кривой необходимо брать из центральной части закругления, чтобы не захватить переходные кривые, расположенные по краям (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема закругления с переходными кривыми

Радиус закругления вычисляют по формуле

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]}, \quad (2)$$

где n – количество точек; x_i, y_i – координаты точек на кривой; x_0, y_0 – координаты центра кривой.

Координаты центра кривой определяются по формулам

$$x_0 = \frac{B_y C_x - B_x C_y}{A_x B_y - A_y B_x}, \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{A_y C_x - A_x C_y}{A_y B_x - A_x B_y}, \quad (4)$$

где $A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y$ – коэффициенты, которые находят по следующим формулам:

$$A_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) x_i; \quad (5)$$

$$B_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i; \quad (6)$$

$$C_x = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (x_i^2 + y_i^2); \quad (7)$$

$$A_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) x_i; \quad (8)$$

$$B_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) y_i; \quad (9)$$

$$C_y = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) (x_i^2 + y_i^2); \quad (10)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (11)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (12)$$

Радиус кривой можно также определить графическим способом в программе AutoCAD по трем точкам. Но дуга не всегда ложится идеально ровно на съёмочные точки круговой кривой. Это приводит к некоторой погрешности при определении величины радиуса в программе AutoCAD. Результаты определения радиуса круговой кривой представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения радиусов кривых

№ кривой	Длина кривой, м	Количество съёмочных точек на кривую	Радиус кривой R , м, определенным способом		
			хорд	AutoCAD	по формулам (2)–(12)
1	105,82	4	210,00	193,26	194,23
2	125,67	7	220,00	205,62	206,78
3	103,89	5	240,00	202,29	204,93
4	81,80	4	230,00	162,78	165,71
5	62,28	4	740,00	685,50	712,97
6	50,31	3	225,00	250,10	250,08
7	87,10	3	270,00	270,93	270,94
8	55,31	3	210,00	279,28	279,29
9	142,52	7	230,00	200,44	201,98
10	146,59	7	230,00	206,94	206,20

При количестве съёмочных точек, равном трем, расхождения в определении радиуса методом AutoCAD и по формулам отсутствуют. При количестве съёмочных точек более трех радиус круговой кривой целесообразнее определять по формулам, т. к. в расчет включаются координаты всех съёмочных точек. Метод хорд дает приблизительное значение величины радиуса круговой кривой.

Расчет длины дуги в зависимости от радиуса представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения длин кривых

Номер кривой	Метод расчета					
	хорд		AutoCAD		по формулам (2)–(12)	
	радиус	длина дуги	радиус	длина дуги	радиус	длина дуги
1	210,00	105,62	193,26	105,83	194,23	105,82
2	220,00	125,44	205,62	125,70	206,78	125,67
3	240,00	103,58	202,29	103,92	204,93	103,89
4	230,00	81,39	162,78	81,83	165,71	81,80
5	740,00	62,27	685,50	62,28	712,97	62,28
6	225,00	50,33	250,10	50,31	250,08	50,31
7	270,00	87,10	270,93	87,10	270,94	87,10
8	210,00	55,38	279,28	55,31	279,29	55,31
9	230,00	141,82	200,44	142,57	201,98	142,52
10	230,00	145,96	206,94	146,56	206,20	146,59

Из таблицы 2 видно, что расхождение в радиусах кривых, полученных в AutoCAD и по формулам, практически не влияет на длину дуги и в конечном счете на длину железнодорожного пути. А вот радиус, полученный методом хорд, вызывает некоторую погрешность при определении длины дуги. Для кривой № 5 видно, что при увеличении радиуса круговой кривой влияние на длину дуги из-за расхождений в радиусах значительно снижается.

Для кривых № 2, 3, 9, 10 отклонения радиуса в каждой съёмочной точке от радиуса, полученного для кривой по формулам, приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения отклонения радиуса

Номер кривой	Координаты точек		Радиус кривой R , м	Радиус кривой в каждой съёмочной точке R_i , м	Отклонение радиуса $R-R_i$, см	СКО, см
	x , м	y , м				
2	1569,21	-944,20	206,78	206,73	5	11
	1572,87	-941,97		206,80	-1	
	1580,19	-938,00		206,78	0	
	1602,95	-927,76		206,86	-8	
	1632,16	-919,18		206,88	-9	
	1660,91	-915,41		206,55	23	
	1689,46	-915,01		206,89	-11	
3	1574,92	-946,91	204,93	204,92	1	15
	1633,90	-926,20		205,11	-18	
	1652,00	-924,07		204,74	19	
	1662,39	-923,31		204,80	13	
	1674,85	-922,88		205,09	-16	
9	-2830,40	8913,89	201,98	201,87	11	10
	-2831,12	8896,24		202,02	-4	
	-2831,39	8893,19		202,05	-7	
	-2834,09	8875,33		202,10	-12	
	-2837,98	8859,59		202,03	-4	
	-2843,49	8843,68		201,79	19	
	-2879,21	8783,12		202,02	-3	
10	-2837,40	8913,98	206,20	206,06	14	9
	-2837,98	8897,55		206,28	-8	
	-2838,31	8893,86		206,31	-11	
	-2840,88	8877,06		206,25	-5	
	-2844,59	8861,35		206,19	1	
	-2849,46	8846,30		206,08	12	
	-2888,43	8779,84		206,22	-2	

Отклонения радиуса в таблице 3 показывают отклонения реальной круговой кривой от теоретической.

Полученное СКО (среднеквадратическое отклонение) радиуса дуги в каждой съёмочной точке рассматриваемых кривых не влияет на результат определения длины круговой кривой. Поэтому радиус и длину кривой можно одинаково достоверно получать как по формулам, так и в программе AutoCAD. Большие отклонения при определении радиуса влияют на правильный выбор скоростного режима и, следовательно, на безопасность движения по путям.

Ширина колеи железнодорожного пути между внутренними гранями головок рельсов на закруглении

Получено 04.04.2023

P. V. Zhdanovich, V. P. Zhdanovich, P. V. Kovtun, V. V. Yaltykhov. Methods for determining the radii of circular curves and the effect of the error in their determination on the length of the railway track.

The method of calculating the radii of circular curves of railway tracks in the plan is presented. Information about the radii of curves is obtained from the results of geodetic survey of railway tracks. Information about radii is used during the reconstruction and repair of tracks on curved sections, when assessing the deviation of the actual position of the axes of the web from the design one after the completion of construction or during the shift during operation. Determining the radii of existing railway tracks is relevant when correcting displacements and when wearing out the bearing structures of the tracks in order to straighten and bring them into a safe working condition.

як с радиусом менее 300 м составляет 1535 мм. Следовательно, радиус левой и правой нитки пути будут отличаться на величину 1535 мм. Такая разбежка в радиусе не оказывает влияния на длину пути при съёмке как по левой, так и по правой нитке (см. таблицу 2). При радиусе кривой 200 м длина левой и правой ниток отличается на 30 мм.

Основные выводы.

1 Анализом способов определения радиусов и длин железнодорожных закруглений (метод хорд, расчет по формулам, определение в AutoCAD) установлено, что при количестве съёмочных точек, равном трем ($n = 3$), отсутствуют избыточные данные. Поэтому AutoCAD и формулы дают одинаковый результат.

При $n > 3$ в AutoCAD можно сделать несколько комбинаций (например, 1, 2, 3; 2, 3, 4; 1, 3, 4; 1, 2, 4), получить радиус кривой для каждой комбинации и затем сравнить их.

При количестве съёмочных точек более трех ($n > 3$) радиус круговой кривой целесообразнее определять по формулам, т. к. возможен контроль, и по формулам (2)–(12) получаем единственное однозначное решение.

2 Расхождения в радиусе кривых, полученных в AutoCAD, и по формулам, практически не влияют на длину дуги и, в конечном счете, на длину железнодорожного пути. Большие отклонения при определении радиуса влияют на правильный выбор скоростного режима и, следовательно, на безопасность движения по путям.

3 Метод хорд при определении радиусов закруглений и длины дуг дает приблизительные с погрешностями результаты.

4 Представленная методология расчетов радиусов закруглений и длин дуг путей может быть применена не только при реконструкции и ремонте на криволинейных участках, но и при экспертной оценке отклонения фактического положения осей полотна от проектного после окончания строительства, в процессе эксплуатации, а также при паспортизации железнодорожных путей.

Список литературы

- 1 Борисов, Э. А. Определение характеристик круговых кривых по хордам / Э. А. Борисов // Известия ВУЗ : Геодезия и аэрофотосъемка. – 1994. – № 2–3. – С. 50.
- 2 Брынь, М. Я. Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых : учеб. пособие / М. Я. Брынь, Н. В. Кашин, В. И. Полетаев ; под ред. М. Я. Брыня. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2008. – С. 36.
- 3 Полетаев, В. И. Расчет железнодорожных кривых : метод. указания / В. И. Полетаев. – Л. : ЛИИЖТ, 1990. – 20 с.
- 4 Раманаускас, Н. Исследование точности измерения ориентации глаза, используя искусственные изображения / Н. Раманаускас, Г. Даунис // Электроника и электротехника. – 2003. – № 4 (46). – С. 17–20.