

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ

В. И. Полетаев, Е. Г. Толстов

СЪЕМКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРИВЫХ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
ПГУПС
2011

УДК 528.48
ПЗ8

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Петербургского государственного университета путей сообщения *Е. С. Свинцов*;
кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского Военного (топографического) института, филиала Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского *Р.-Б. Б. Станиславичюс*

Полетаев В. И.

ПЗ8 Съемка железнодорожных кривых: учеб. пособие / Полетаев В. И., Толстов Е. Г. – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011. – 37 с.

Рассмотрены способы детальной съемки железнодорожных кривых, приведены методы определения их элементов, необходимых для нахождения на местности главных точек кривых с последующим расчетом сдвижек пути для его постановки в правильное, соответствующее техническим условиям положение.

Предназначено для слушателей Института повышения квалификации и переподготовки специалистов.

УДК 528.48

© Полетаев В. И., 2011
© Толстов Е. Г., 2011
© Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011

Введение

Прямолинейные участки железнодорожного пути сопрягаются между собой круговыми и переходными кривыми. На переходных кривых радиус кривизны меняется от бесконечности в месте сопряжения с прямой до значения радиуса круговой кривой. Длина переходной кривой зависит от величины превышения наружного рельса над внутренним, определяемым в зависимости от среднеквадратического значения скорости проходящих поездов. Отвод превышения в пределах переходной кривой осуществляется с уклоном, устанавливаемым техническими условиями на эксплуатацию железных дорог [1].

При движении поездов со скоростью, отличной от расчетной, в кривой возникают дополнительные горизонтальные поперечные силы, оказывающие негативное воздействие на железнодорожный путь. Повышенное воздействие поездов на железнодорожный путь в кривых вызывает интенсивный износ элементов пути и подвижного состава и приводит к нарушению геометрического очертания кривых. В связи с этим к конструкции пути в кривых и их текущему содержанию предъявляются более жесткие требования.

Фактическое положение кривых на местности периодически проверяется подробной инструментальной съемкой. Съемка железнодорожных кривых выполняется с целью нанесения кривой на план для определения элементов кривой и нахождения отступлений фактического положения кривой от проектного, численные значения которых позволяют путем сдвижки (рихтовки) пути придать кривой правильное геометрическое положение. Под правильным положением кривой в плане понимается соблюдение плавности переходных кривых и постоянство радиуса кругового участка. Если кривая составлена из участков различных радиусов, необходимо обеспечить плавный переход от одного радиуса к другому.

При текущем содержании железнодорожного пути основным методом съемки кривых является метод стрел, которые измеряются от хорды принятой длины. На основании измеренных стрел изгиба и превышения в точках разметки кривой устанавливается соответствие проекту и оценивается удовлетворяют ли отдельные параметры техническим требованиям.

Достоинством этого метода является простота и высокая точность измерения стрел. Полученные результаты измерений наглядно показывают на соответствие фактического положения кривой ее проектным данным. Недостатком метода является накопление ошибок измерения стрел от на-

чала кривой к ее концу, что не позволяет привести кривую в точное геометрическое положение. Из-за сложности расчетов определение координат точек при съемке кривой этим методом не выполняется, и нанесение ее на план затруднительно. Недостатком также является необходимость немедленного выполнения работ по выправке кривой после измерения стрел, так как они при проходе поездов могут изменяться.

При проектировании плана переустраиваемой линии и составлении проектов ремонта пути необходимо определить и выдержать параметры каждой кривой. В изыскательской практике наиболее распространенным способом съемки кривых для этой цели является измерение стрел изгиба от длинных хорд с измерением углов поворота каждой хорды. На основании этих измерений коллективом работников Ленгипротранса под руководством инженера И. В. Гоникберга разработан способ определения радиуса, длины кривой, привязки к пикетажу, а также рихтовки пути по эпюре углов – способ угловых диаграмм. Углы поворота хорд назначают либо по оси пути, либо по одному из рельсов, чаще всего по упорной (наружной) нити кривой. В результате обработки полевых измерений есть возможность определения координат точек углов поворота хорд и, следовательно, нанесения их на план. При съемке положения кривой по упорному рельсу расчет сдвижек и ее выправку необходимо проводить оперативно, так как возможны смещения снимаемых точек под воздействием подвижного состава. Для оперативного контроля положения кривой при текущем содержании железнодорожного пути находит применение ее съемка с опорных точек, заложенных на земляном полотне. Ординаты с помощью нивелирной рейки измеряют в точках деления кривой относительно линии, соединяющей соседние точки. Достоинством данного метода является возможность постановки кривой по ординатам и проверки положения отдельных точек кривой без выполнения ее полной съемки. Закрепление же значительного количества точек на земляном полотне представляет существенные трудности как при их закладке, так и при эксплуатации. Эти затруднения снимаются созданием реперной системы на большинстве скоростных магистралей. Сеть рабочих реперов на расстоянии не более 3,5 м от оси пути закладываются через 50–70 м на кривых и через 100–140 м – на прямых участках пути. Пункты, расположенные парами напротив друг друга, позволяют создать контрольный створ, относительно которого надежно определяется положение основных точек рельсовой колеи. Конструкция пунктов позволяет производить установку геодезического прибора и визирного знака, относительно создаваемой визирной линии рассчитываются проектные ординаты в точках разметки кривой.

В условиях значительного увеличения скоростей движения поездов требования к нормам содержания пути в кривых решительно повышаются, а существующие технологии съемки и расчета кривых не обеспечивают их

проектного положения. Решение данной проблемы возможно с переходом в координатную форму контроля геометрических параметров пути с использованием современных геодезических приборов спутниковых навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС), сканерных систем. Наиболее мобильными и более доступными для контроля положения кривых являются электронные тахеометры. Съёмка кривых тахеометром позволяет определить координаты заданных точек кривой, которые можно преобразовать из одной системы в другую, решая задачи оценки плавности кривой, соответствие ее положения проектному, нахождение элементов кривой с расчетом расположения на местности ее главных точек.

Расчеты по определению сдвижек пути в кривых для постановки их в правильное положение, соответствующее техническим условиям эксплуатации для заданных скоростей движения поездов, рассматриваются в специальных дисциплинах [2], [3]. В данной работе излагается методика выполнения полевых съемочных работ для определения элементов кривой и нахождения пикетажного положения ее главных точек. Для способа съемки кривой электронным тахеометром с координированием ее точек дается комплексная методика определения всех параметров кривой, необходимых для ее постановки в геометрическое положение, соответствующее принятому радиусу кривой.

1. СЪЕМКА КРИВЫХ МЕТОДОМ СТРЕЛ ПРОГИБА

Для выполнения съемочных работ кривую и примыкающие к ней прямые участки пути размечают по рабочей грани наружного рельса на равные отрезки длиной по 10 м при радиусе кривой более 400 м или по 5 м при меньшем радиусе. Разметку и нумерацию точек ведут в направлении нарастания пикетажа. На прилегающих к кривой прямых участках пути фиксируют 3–4 точки, в которых при съемке стрелы прогиба будут равными нулю. Точки закрепляют вертикальной чертой на внутренней стороне шейки рельса несмываемой краской. Начальной точке присваивают нулевой номер. Эту точку увязывают с существующим пикетажем. Контроль определения пикетажного положения нулевой точки проверяют привязкой к имеющимся постоянным элементам сооружений – трубы, малые мосты, стрелочные переводы и т. д. В случае отсутствия на участке съемки пикетажа для определения положения на местности главных точек кривой начальной точке дается нулевое значение.

Стрелы прогиба измеряют в каждой точке деления кривой, для чего две соседние с ней точки деления соединяют шнуром, являющимся хордой двадцати- или десятиметровой длины (рис. 1).

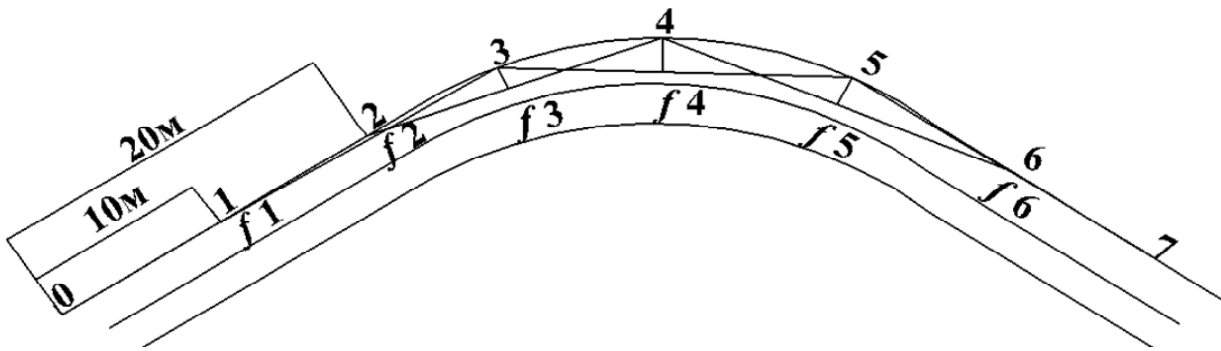


Рис. 1. Съёмка кривой методом стрел прогиба

Для съёмки, как правило, используют капроновый шнур толщиной 0,5 мм. Шнур прикладывают к незакругленной части рабочей грани головки наружного рельса на высоте 13 мм от поверхности катания и в точке, расположенной в середине шнура с помощью линейки, торец которой имеет нулевое значение, измеряется расстояние между головкой рельса и шнуром – хордой, являющееся стрелой прогиба. Стрелы отсчитывают со стороны шнура, обращенной к рельсу с точностью 0,5 мм. При измерении стрел в начале и конце кривых, включая прямые участки пути, используются специальные подкладки толщиной 12–15 мм, позволяющие фиксировать минусовые стрелы при наличии обратного изгиба кривой. При работе с подкладками их толщина вычитается из полученного замера. Фиксацию шнура по головке рельса можно осуществлять как вручную, так и с помощью специальных скоб – струбцин, позволяющих выполнить необходимое натяжение шнура. Контроль замера стрел производится повторным их измерением в обратном направлении.

При съёмке кривой, кроме стрел прогиба, выполняют измерения от оси пути до бровки земляного полотна и до всех близко расположенных сооружений и устройств. На двухпутных участках измеряются расстояния между осями путей. Если величина междупутья явно не изменяется, то, как правило, промеры выполняют через пять делений в точках, номера которых оканчиваются нулем или пятеркой. Выполняемые габаритные измерения необходимы для определения точек кривой, имеющих ограничения по сдвигу при постановке кривой в расчетное положение. Возможными препятствиями для сдвига являются мосты, тоннели, трубы, стоящие вблизи пути, здания, путевые знаки, светофоры, недостаточная ширина обочины земляного полотна и т. д. Для определения длины переходной кривой и проверки правильности отвода возвышения наружного рельса на входе в кривую и на выходе из нее производится замер возвышения в точках деления кривой. В пределах круговой кривой возвышение наружного рельса должно быть постоянным, а на переходных кривых его отвод осуществля-

ется с уклоном, зависящим от радиуса круговой кривой и скоростей движения поездов.

Результаты всех измерений заносят в журнал съемки кривой, форма которого приведена в табл. 1.

Таблица 1

Журнал съемки кривой

Номер точки деления кривой	Измеренные стрелы			Допустимая сдвигка по ширине обочины		Расстояние между осями путей	Отметки: а) об увязке нулевой точки с пикетажом б) об ограничивающих сдвигаках в местах препятствий
	Прямо	Обратно	Среднее	В сторону наружной бровки	В сторону внутренней бровки		
1	2	3	4	5	6	7	8

По измеренным стрелам прогиба определяются угол поворота, радиус и все элементы кривой, необходимые для нахождения пикетажного положения главных точек кривой. Аналитический расчет параметров и положения кривой по стрелам прогиба начинается с определения угла поворота по формуле

$$\alpha = \frac{114,6 \sum f}{a},$$

где a – интервал деления кривой в м.

Так как величина угла поворота не зависит от радиуса кривой и степени ее расстройства и является постоянной для данной кривой, контроль полевых съемочных работ можно выполнить по теоретической сумме стрел прогиба, найденной по значению угла, взятому из профиля и определенному ранее инструментально:

$$\sum f_{\text{теор}} = a \cdot \alpha / 114,6 \text{ (мм)}.$$

Результат замера стрел можно считать удовлетворительным, если разность сумм измеренных и проектных стрел не превышает величины

$$\Delta f = \sum f_{\text{изм}} - \sum f_{\text{теор}} = 2\sqrt{n},$$

где n – число точек, в которых измерены стрелы, относящиеся к кривой.

Геометрически правильная кривая, имеющая переходные кривые, характеризуется закономерностью распределения стрел прогиба, напоминающей трапецию (рис. 2).

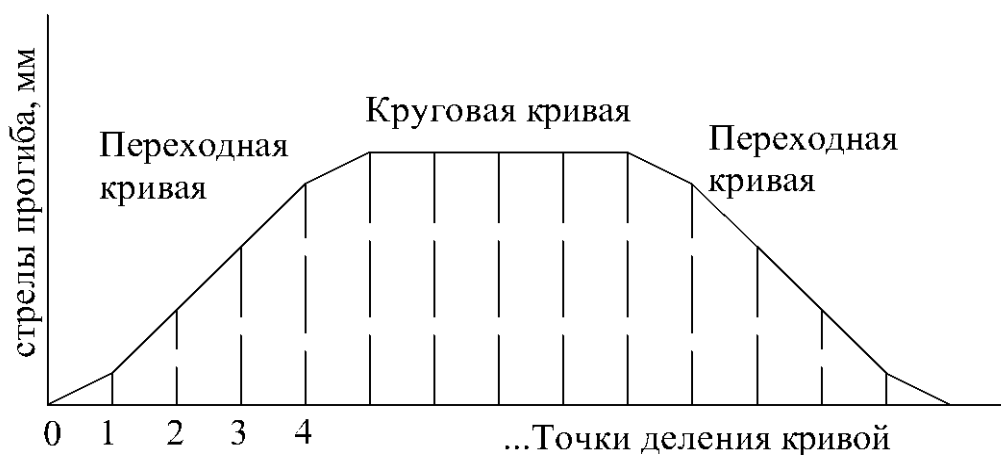


Рис. 2. График стрел прогиба геометрически правильной кривой

На круговом участке кривой все стрелы прогиба равны, а на переходных кривых разность между стрелами в смежных точках является постоянной величиной. В процессе эксплуатации железнодорожного пути его геометрическое очертание нарушается, и стрелы прогиба как на переходных кривых, так и в пределах круговой кривой могут значительно отличаться от проектных. Допустимые значения разностей смежных стрел прогиба, измеренных от двадцатиметровой хорды, в зависимости от скорости движения пассажирских поездов приведены в табл. 2.

Таблица 2

V , км/ч	15	16–40	41–60	61–80	81–140	141–160
$f_n - f_{n-1}$, мм	30	25	20	15	10	8

Для графического определения элементов кривой строится график измеренных стрел, на котором с учетом равных площадей проводятся линии круговых и переходных кривых. В пределах круговой кривой линия проектных стрел должна быть горизонтальной, а в пределах переходных кривых – наклонной. Из графика измеренных стрел определяются длины переходных кривых и средняя стрела круговой кривой $f_{ср}$.

Длины переходных кривых равны проекции наклонной стороны трапеции на горизонтальную ось. Взятые из графика стрел прогиба длины переходных кривых округляют и принимают кратными 10 м с учетом задаваемого уклона отвода возвышения наружного рельса. Значения рекомендуемых и предельно допустимых уклонов отвода возвышения для реализуемых скоростей движения пассажирских поездов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Уклон возвышения наружного рельса, ‰		Скорость движения поездов, км/ч
Рекомендуемый	Допустимый	
0,5	0,5	161–200
0,5	0,67	141–160
0,67	0,7	121–140
0,8	1,0	101–120
1,0	1,4	81–100
1,6	1,9	61–80
2,1	2,7	51–60
2,5	3,0	41–50
2,7	3,1	26–40
3,0	3,2	25 и менее

При известных значениях угла поворота, радиуса и длин переходных кривых вычисляются значения суммарной длины кривой и всех ее элементов, необходимых для вычисления начала и конца кривой. При неизвестной величине радиуса кривой его значение находится по измеренным стрелам прогиба. Зависимость величины радиуса от стрелы прогиба, измеренной от хорды принятой длины, показана на рис. 3.

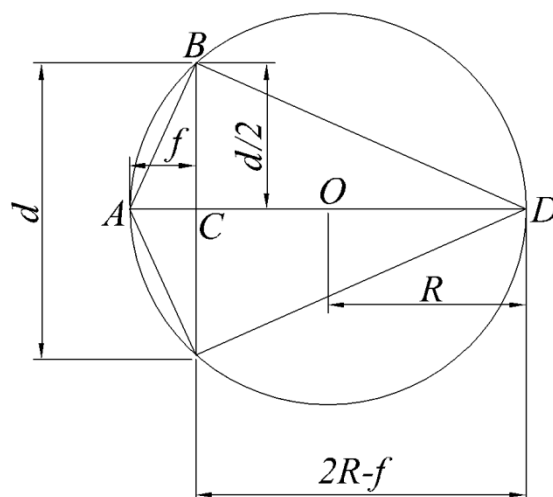


Рис. 3. Определение зависимости между радиусом и стрелой прогиба

Из подобия треугольников ABC и CBD имеет место отношение

$$\frac{f}{d/2} = \frac{d/2}{2R - f},$$

откуда

$$R = \frac{d^2 + 4f^2}{8f}.$$

Учитывая, что значение f много меньше величины $2R$ им можно пренебречь,

$$R = \frac{d^2}{8f}.$$

Значения стрел прогиба кривых основных радиусов при длине хорды 20 м и 10 м приведены в табл. 4.

Таблица 4

Радиус, м	200	250	300	350	400	500	600	700	800
Стрела прогиба, мм при $d=10$ м	62	50	48	36	–	–	–	–	–
Стрела прогиба, мм при $d=20$ м	–	–	–	–	125	100	83	71	62
Радиус, м	900	1000	1200	1500	1800	2000	2500	3000	4000
Стрела прогиба, мм при $d=20$ м	55	50	42	33	28	25	20	17	12

Фактическая величина прогиба на круговой кривой может приниматься приближенно по графику стрел прогиба, вычисляться аналитически как среднее из стрел прогиба на круговой кривой или находиться по значению длины круговой кривой, определенной по измеренным стрелам прогиба и принятым длинам переходных кривых [3].

$$K = 10 \sqrt{\frac{24 \sum \sum \sum f}{\sum f} - 12 \left(\frac{\sum \sum f}{\sum f} \frac{\sum \sum f}{\sum f} + 1 \right) - 2 \left(\frac{l}{a} \right)^2},$$

где $\sum f$ – сумма измеренных стрел прогиба;

$\sum \sum f$ – сумма сумм стрел прогиба;

$\sum \sum \sum f$ – сумма суммы сумм стрел прогиба;

l – длина переходной кривой;

a – интервал деления кривой.

При различных длинах переходных кривых

$$\left(\frac{l}{a} \right)^2 = \frac{(l_1 / a)^2 + (l_2 / a)^2}{2}.$$

Расчетная стрела изгиба $f_{\text{расч}}$ на круговой кривой для найденной круговой кривой равна

$$f_{\text{расч}} = \frac{a \cdot \sum f}{K}.$$

По вычисленному значению расчетной стрелы прогиба и найденному ранее углу поворота и длине круговой кривой вычисляется ее радиус по формулам:

$$R = \frac{d^2}{8f_{\text{расч}}};$$

$$R = \frac{180 \cdot K}{\pi \cdot \alpha}.$$

Пикетажное положение главных точек кривой осуществляется согласно привязке начальной точки к существующему пикетажу железной дороги. Пикетажное положение конечной точки разбивки, в которой стрела прогиба равна нулю, вычисляется согласно количеству точек деления кривой. Расстояние от последней точки съемки кривой до ее середины вычисляется по формуле

$$X = a \frac{\sum \sum f}{\sum f} \text{ м.}$$

Следовательно, пикетажное положение середины кривой (ПК СК) равно разности пикетажного положения конечной точки и найденного расстояния X . ПКСК = ПК конечной точки – X . Согласно вычисленному пикетажному положению середины кривой определяется положение всех основных точек кривой.

$$\text{ПК НК} = \text{ПК НПК}_1 = \text{ПК СК} - \frac{K+l}{2};$$

$$\text{ПК КК} = \text{ПК НПК}_2 = \text{ПК СК} + \frac{K+l}{2};$$

$$\text{ПК КП } K_1 = \text{ПК НПК}_1 + l;$$

$$\text{ПК КП } K_2 = \text{ПК НПК}_2 - l.$$

Пример. Разбивка кривой и ее подходов выполнена с интервалом $a = 10$ м. С помощью капронового шнура измерены стрелы прогиба кривой от хорды $d = 20$ м. Нулевой номер деления кривой присвоен точке, в которой стрела прогиба $f_0 = 0$. Эта точка привязана к пикетажу и находится на ПК 210 + 22,00. Конечная точка, в которой стрела прогиба также равна

нулю, имеет восемнадцатый номер, то есть расположена на расстоянии 180 м от начала съемки и, следовательно, ее пикетажное положение равно ПК 212 + 02,00 м. По измеренным стрелам изгиба, приведенным в табл. 5, требуется определить элементы кривой и пикетажное значение ее главных точек.

Таблица 5

Номер точки деления кривой	Стрела прогиба	Σf	$\Sigma \Sigma f$	Привязка к пикетажу
0	0			ПК 210 + 22,00
1	4	0	0	
2	14	4	4	
3	38	18	22	
4	40	56	78	
5	45	96	174	
6	61	141	315	
7	48	202	517	
8	54	250	767	
9	52	304	1071	
10	44	356	1427	
11	47	400	1827	
12	56	447	2274	
13	48	503	2877	
14	41	551	3428	
15	46	592	4020	
16	34	626	4646	
17	12	660	5296	
18	0	672	5968	ПК 212 + 02,00
	$\Sigma f = 672$	$\Sigma \Sigma f = 5968$	$\Sigma \Sigma \Sigma f = 34711$	

На основании полевых измерений строится график натуральных стрел прогиба, на котором проводятся приближенные проектные стрелы на круговой и переходных кривых (рис. 4).

Длина переходных кривых принята согласно натурным и приближенному графику проектных стрел прогиба $l_1 = l_2 = 50$ м. Для определения элементов кривой в таблице выполнен подсчет Σf , $\Sigma \Sigma f$, $\Sigma \Sigma \Sigma f$.

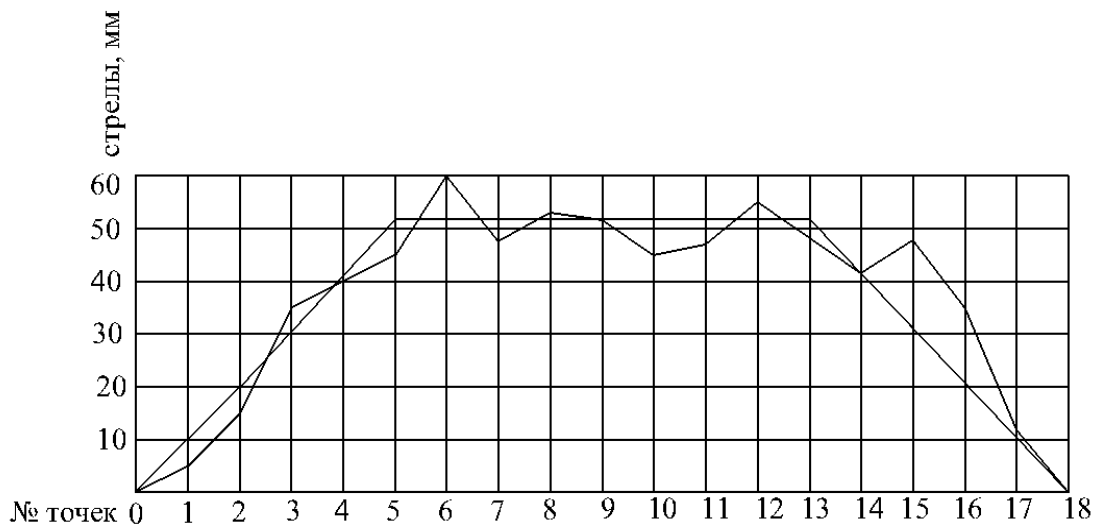


Рис. 4. График стрел прогиба кривой

Согласно найденным данным вычисляются следующие значения.

1. Угол поворота кривой

$$\alpha = 114,6 \cdot \frac{\sum f}{a} = 114,6 \cdot \frac{672}{10000} = 7,70112 = 7,42'$$

2. Длина круговой кривой

$$K = 10 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \sum \sum \sum f}{\sum f} - 12 \cdot \frac{\sum \sum f}{\sum f} \left(\frac{\sum \sum f}{\sum f} + 1 \right) - 2 - \left(\frac{l}{a} \right)^2} =$$

$$= 10 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot 34711}{672} - 12 \cdot \frac{5968}{672} \left(\frac{5968}{672} + 1 \right) - 2 - \left(\frac{50}{10} \right)^2} = 126,44 \text{ м.}$$

3. Расчетная длина прогиба на круговой кривой

$$f_{\text{расч}} = \frac{a \cdot \sum f}{K} = \frac{10 \cdot 672}{126,44} = 53,1 \text{ мм.}$$

4. Радиус круговой кривой

$$R = \frac{d^2}{8f_{\text{расч}}} = \frac{20^2 \cdot 1000}{8 \cdot 53,1} = 941,6 \text{ м.}$$

По найденным значениям радиуса кривой и углу поворота можно проверить правильность вычисления длины круговой кривой

$$K = \frac{\pi R \alpha}{180} = \frac{3,14 \cdot 941,6 \cdot 7,7}{180} = 126,47 \text{ м.}$$

Расхождение с ранее найденной величиной круговой кривой составляет 3 см, что находится в пределах допусков.

Расстояние от последней точки съемки кривой (точка 18), расположенной на ПК 212 + 02,00 до середины кривой

$$X = a \frac{\sum \sum f}{\sum f} = \frac{10 \cdot 5968}{672} = 88,81 \text{ м.}$$

Следовательно, середина кривой находится на

$$\text{ПКСК} = \text{ПК}212 + 02,00 - 88,81 = \text{ПК} 211 + 13,19.$$

По найденному положению середины кривой определяется положение всех ее основных точек:

$$\begin{aligned} \text{ПК НК}(\text{ПК НП } K_1) &= \text{ПК СК} - \frac{K+l}{2}, = \text{ПК}211 + 13,19 - \frac{126,44 + 50}{2} = \\ &= \text{ПК}210 + 24,92; \end{aligned}$$

$$\text{ПК КП } K_2 = \text{ПК НК} + l = \text{ПК}210 + 24,92 + 50 = \text{ПК}210 + 74,92;$$

$$\begin{aligned} \text{ПК КК}(\text{ПК НП } K_2) &= \text{ПК СК} + \frac{K+l}{2}, = \text{ПК}211 + 13,19 + \frac{126,44 + 50}{2} = \\ &= \text{ПК}212 + 01,44; \end{aligned}$$

$$\text{ПК КП } K_2 = \text{ПК КК} - l = \text{ПК}212 + 01,44 - 50 = \text{ПК}211 + 51,41.$$

2. СЪЕМКА КРИВЫХ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СТРЕЛ ПРОГИБА ОТ ДЛИННЫХ ХОРД

При съемке кривой способом измерения стрел прогиба от длинных хорд кривую и прилегающие к ней прямые участки пути на длине 30–40 м от видимого начала кривой по наружной нити разбивают на отрезки 20 м при радиусах кривых более 400 м и 10-метровые отрезки при меньших радиусах. Измерения выполняют по оси пути или по наружному рельсу. Закрепление точек деления кривой осуществляют на внутренней шейке наружного рельса несмываемой краской.

Начальную точку разметки привязывают к пикетажу или дают ей условное значение при его отсутствии. Измерения углов поворота хорд и стрел прогиба в точках разметки начинают с начальной точки, расположенной на прямом участке пути. Последующие стоянки теодолита назначают через 100–120 м при радиусах кривых более 400 м и через 60–80 м – при меньших радиусах. Длина хорд определяется величиной стрел прогиба, так как назначение больших расстояний вызывает увеличение стрел прогиба и, как следствие, уменьшение точности измерений.

Углы между хордами измеряются теодолитом полным приемом. Если имеется прямая видимость с начальной на конечную точку разбивки, теодолитный ход следует замыкать, измеряя примычные углы.

При отсутствии прямой видимости на конечную точку теодолитный ход замыкается на промежуточные точки, что позволяет выполнить контроль измерения горизонтальных углов (рис. 5).

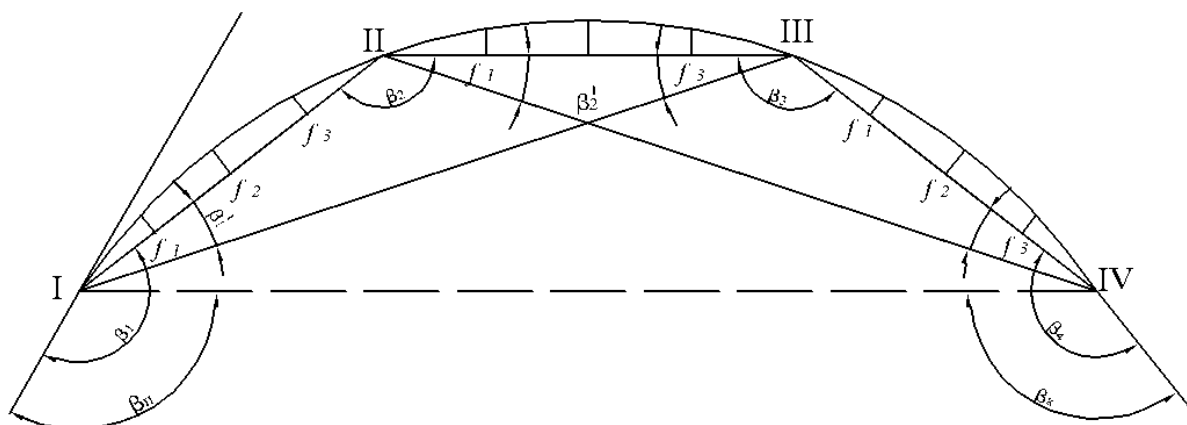


Рис. 5. Способ измерения стрел прогиба от хорд

Во всех точках деления кривой измеряют по установленной горизонтально нивелирной рейке стрелы прогиба. Измерения выполняют в прямом и обратном направлениях. Результаты измерений углов и стрел прогиба заносят в журнал съемки кривой (табл. 6).

Таблица 6

Журнал съемки кривой

Номер точки стояния ПК +	Круг	Номер точки визирования	Отсчеты по горизонтальному кругу		Значение угла	Положение точек	Стрелы прогиба			Примечание
			0	/			0	/	I	
I	Л	Назад II				+20				
						+40				
	П	Назад II				+60				

По измеренным углам между основными хордами вычисляют углы поворота каждой хорды:

$$\alpha_1 = 180 - \beta_1;$$

$$\alpha_2 = 180 - \beta_2.$$

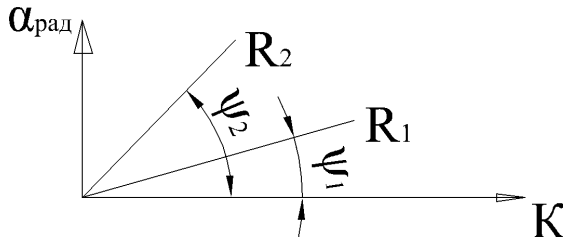


Рис. 6. Зависимость угла поворота от длины кривой

Определение длины кривой и ее радиуса выполняется по угловой диаграмме, выражающей зависимость угла поворота α от длины кривой K и показывающей, что каждой круговой кривой данного радиуса соответствует вполне определенный угол наклона угловой линии к оси абсцисс (рис. 6).

Чем больше радиус кривой, тем меньше кривизна и, следовательно, меньше угол наклона угловой линии к оси абсцисс K .

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha_{\text{рад}}}{K} = \frac{1}{R}.$$

Для построения угловой диаграммы существующей кривой необходимо определить углы φ между начальной касательной и касательными, проведенными к кривой в точках, расположенных друг от друга на расстоянии согласно принятому интервалу деления кривой — 10 или 20 м (рис. 7).

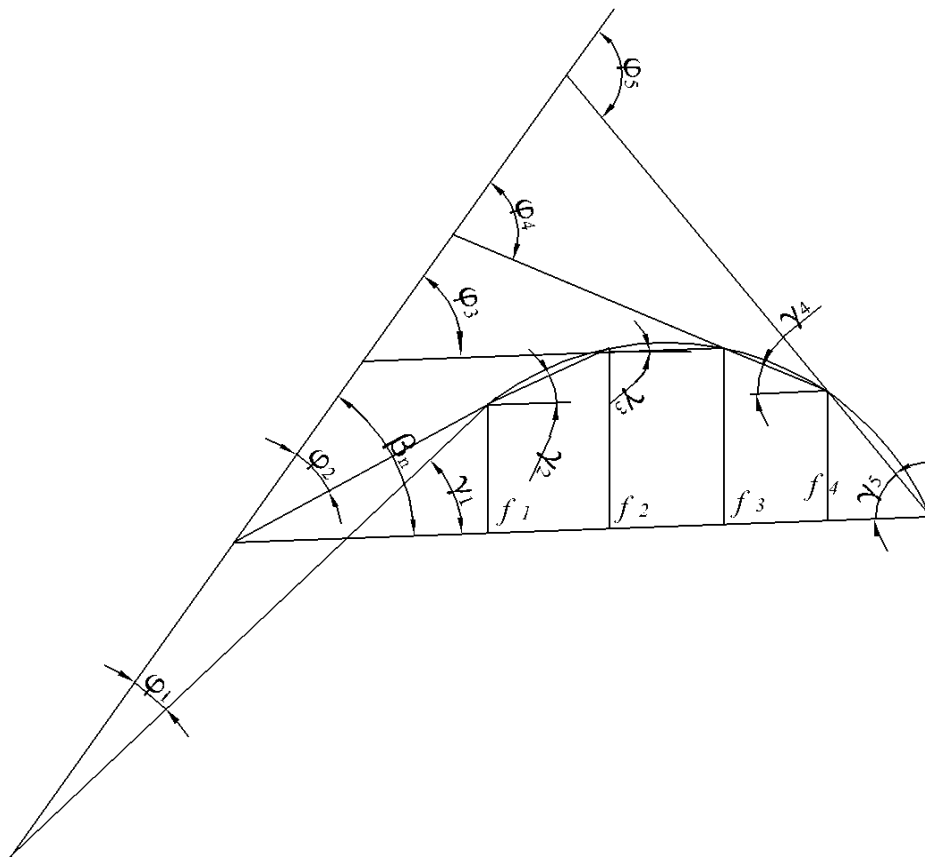


Рис. 7. Схема определения углов поворота хорд относительно начальной касательной

Для определения углов φ определяются углы между начальной касательной и основными хордами β_n :

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \alpha_1; \\ \beta_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 = \beta_1 + \alpha_2; \\ \beta_3 &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \beta_2 + \alpha_3; \\ \alpha_n &= \beta_{n-1} + \alpha_n.\end{aligned}$$

Последнее значение вычисленного угла равно общему углу поворота кривой

$$\beta_n = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = \alpha.$$

Затем определяются углы между начальной касательной и хордочками, стягивающие соседние точки разбивки кривой (хордочки-двадцатки) φ . Эти углы равны разности углов между начальной касательной и основными хордами β и углами между каждой хордочкой-двадцаткой и основной хордой γ .

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \beta_n - \gamma_1; \\ \varphi_2 &= \beta_n - \gamma_2 \dots \varphi_n = \beta_n - \gamma_n.\end{aligned}$$

Принимая длину каждой хордочки-двадцатки равной длине дуги, которые из-за малости расстояния близки друг к другу, можно записать

$$\begin{aligned}\sin \gamma_1 &= \frac{f_1}{20}, \\ \sin \gamma_2 &= \frac{f_2 - f_1}{20} \text{ и т. д.}\end{aligned}$$

Обозначив разность соседних стрел прогиба через Δf , получим

$$\sin \gamma = \frac{\Delta f}{20} = \gamma_{\text{рад}}.$$

Выражая все углы в радианах, для искомым углов $\varphi_n = \beta_n - \gamma_n$ получим

$$\varphi_n = \beta_n - \frac{f_1}{20} \text{ или } 20\varphi_n = 20\beta_n - \Delta f.$$

На основании расчетов, выполняемых по полученной формуле, строится угловая диаграмма. Для построения угловой диаграммы все углы поворота основных хорд переводят в радианы и принимают их двадцатикратные значения $-20\alpha_{\text{рад}}$. Полученное значение для каждой основной

хорды умножают на число делений кривой в пределах хорды. Сумма полученных двадцатикратных значений углов поворота каждой основной хорды в радианах должна быть равна двадцатикратному значению угла поворота всей кривой в радианах.

В пределах каждой основной хорды вычисляется алгебраическая разность стрел прогиба $\Delta f = f_{\text{посл}} - f_{\text{пред}}$.

Алгебраическая сумма разностей стрел прогиба $\Sigma \Delta f$ в пределах каждого угла поворота хорд должна быть равна нулю.

Разность сумм двадцатикратных значений углов поворота каждой основной хорды и разностей соседних стрел прогиба $(20\beta_{\text{рад}} - \Delta f)$ соответствует двадцатикратной радианной мере углов поворота хордочек-двадцаток существующей кривой относительно начальной кривой. По этим данным строится углограмма существующей кривой.

Для построения углограммы рекомендуется принимать масштабы: горизонтальный 1:1000 (в 1 см 10 м) и вертикальный (в 1 см 0,02 рад).

Пользуясь принятыми масштабами, по горизонтали откладываются все расстояния между точками деления кривой и по вертикали – углы поворота каждой хордочки-двадцатки относительно первоначальной касательной.

$\varphi = (20\beta_{\text{рад}} - \Delta f) / 20$. Их отложение производится в точках, соответствующих середине каждой хордочки-двадцатки. В конце полевых замеров откладывается по вертикали значение угла поворота всей кривой, и через вершину полученной точки проводится горизонтальная прямая. При соединении намеченных точек получается угловая линия существующей кривой.

На построенной углограмме фиксируется точка середины кривой (СК), через которую проходят все угловые линии правильных круговых кривых, вписанных в этот угол. Положение точки СК определяется координатами

$$X_{\text{ск}} = \frac{\omega_c}{\alpha_{\text{рад}}},$$

$$Y_{\text{ск}} = \frac{\alpha_{\text{рад}}}{2}.$$

Значение абсциссы $X_{\text{ск}}$ является расстоянием от конечной точки полевых замеров до точки СК. Согласно пикетажному положению этой точки находится пикетажное положение точки СК, которое фиксируется на угловой диаграмме. Через найденную точку СК проводится угловая линия круговой кривой. Эту линию проводят, максимально приближая ее к построенной угловой диаграмме.

Площадки углограммы, находящиеся вверху угловой линии, должны быть равными площадкам, находящимся снизу.

Расстояние между точками пересечения угловой линии с горизонтальными линиями, соответствующими началу и концу отсчетов углов, является длиной круговой кривой, которая определяется по угловой диаграмме графическим методом. По найденному значению круговой кривой вычисляется ее радиус

$$R = \frac{K}{\alpha_{\text{рад}}}$$

Положение начала и конца круговой кривой определяется согласно пикетажному положению точки СК по длине круговой кривой K .

$$\text{ПК НКК} = \text{ПК СК} - K/2,$$

$$\text{ПК ККК} = \text{ПКСК} + K/2.$$

Длины переходных кривых принимаются согласно возвышению наружного рельса в пределах круговой кривой и уклону его отвода на переходных кривых. Пикетажные значения НКП и КПК обеих переходных кривых определяется согласно пикетажному значению НКК и ККК.

$$\text{ПК НКК}_1 = \text{ПК НКК} - l/2;$$

$$\text{ПК КПК}_1 = \text{ПК НКК}_1 + l/2;$$

$$\text{ПК НКК}_2 = \text{ПК ККК} + l/2;$$

$$\text{ПК КПК}_2 = \text{ПК ККК} - l/2.$$

Порядок расчета кривых по методу угловых диаграмм рассматривается в приведенном ниже примере.

Пример. Кривая и прилегающие к ней прямые участки пути разбиты на 20-метровые отрезки. Начальная точка разбивки находится на ПК 7 + 40 м. С четырех стоянок теодолита измерены правые по ходу горизонтальные углы и вычислены углы поворота каждой хорды. Относительно хорд с помощью нивелирной рейки измерены стрелы прогиба в каждой точке деления кривой. Данные полевых измерений заносятся в ведомость для подсчета данных, необходимых для построения угловой диаграммы (табл. 7).

В графу 1 табл. 7 ведомости заносится вычисленный пикетаж начала и конца круговых и переходных кривых. В графе 2 фиксируется пикетаж точек разбивки, а в графу 3 напротив стоянок теодолита выписываются углы поворота хорд в градусной мере (числитель) и перевод их в радианную меру с двадцатикратным увеличением – 20α рад (знаменатель).

Ведомость подсчета площадей диаграммы существующей кривой

Пикетаж начала и конца кривых	Пикетаж точек деления кривых	α		$f, \text{ мм}$	Подсчет n площадей диаграммы существующей кривой		
		$20\alpha\rho$	$n \cdot 20\beta\rho$		$\pm\Delta f_{\text{мм}}$	$\varphi n = 20\beta\rho - \Delta f$	ωc
1	2	3	4	5	6	7	8
	7 + 40	$1^{\circ}16'$		0			
	+ 60	0,442	0,442	0444	444	-0,002	-0,002
	+ 80		x5	0351	407	0,035	0,033
	ПК7 + 100		2,210	1017	166	0,276	0,309
	+ 20			0,789	-228	0,670	0,979
	+ 40	$7^{\circ}15'$		0	-789	1,231	2,210
	+ 80	2,531	2,937	1143	1143	1,830	4,040
	ПК8 + 00		x5	1728	585	2,388	6,428
	+ 20		14,865	1730	2	2,971	9,399
	+ 40	$8^{\circ}01'$		1188	-545	3,515	12,914
	+ 60	2,798	5,771	0	-1188	4,165	17,075
	+ 80		x6	1037	1037	4,734	21,809
	ПК9 + 00		34,626	1520	483	5,288	27,097
	+ 20			1442	78	5,849	32,946
	+ 40			1052	390	6,161	39,107
	ПК9 + 60	$1^{\circ}26'$		0535	-517	6,288	45,395
		0,500	6,271	0	-535	6,306	51,701

В рассматриваемом примере на первой стоянке теодолита при $\alpha = 1^{\circ}16'$ $20\alpha\beta = 0,442$, на второй стоянке теодолита при $\alpha = 7^{\circ}15'$ $20\alpha\rho = 2,531$ и т. д.

В графу 4 против каждой стоянки теодолита в виде дроби записывается в числителе последовательная сумма всех двадцатикратных значений измеренных углов в радианах: на первой стоянке теодолита 20β рад = 0,422, на второй стоянке 20β рад = 0,422 + 2,531 = 2,973, на третьей стоянке 20β рад = 2,973 + 2,798 = 5,771 и т. д.

В знаменателе этой графы записывается значение $n \cdot 20\beta$ рад, где n – число делений кривой: на первой стоянке $0,442 \cdot 5 = 2,210$, на второй стоянке $2,973 \cdot 5 = 14,865$ и т. д.

Проверкой вычислений на данном этапе является равенство значения последнего числителя графы 4 и двадцатикратного значения угла поворота всей кривой в радианах. В нашем примере числитель последней дроби равен 6,271. Угол поворота кривой в радианах ($17^{\circ}58' \cdot 20$) : 57,3 = 6,271.

Согласно значениям стрел прогиба f (графа 5) в графу 6 заносится их алгебраическая разность: $\Delta f_1 = f_2 - f_1 = 444' - 0 = 444$. $\Delta f_2 = 851 - 444 = 407$ и т. д.

Проверкой вычисления графы 6 служит нулевое значение суммы найденных величин в пределах каждой основной хорды.

В графе 7 вычисляется алгебраическая разность 20β рад – ($\pm\Delta f$), то есть разность числителей графы 4 и 6. Значение Δf при вычислениях берется в метрах.

На первой стоянке от значения 0,442 вычитаются величины Δf : $0,442 - (-0,444) = 0,002$; $0,442 - 0,407 = 0,035$ и т. д. На второй стоянке: вычитание величин Δf выполняется от значения 2,973. $2,973 - 1,143 = 1,830$, $2,973 - 0,585 = 2,388$ и т. д.

Данные графы 7 равны двадцатикратной радианной мере углов поворота хордочек-двадцаток существующей кривой. По этим данным строится угловая диаграмма.

В графе 8 производится последовательное суммирование всех данных графы 7. Каждая сумма соответствует площади углограммы существующей кривой от ее начала до соответствующей точки деления кривой. Последнее значение суммы является площадью всей углограммы, по которому проверяется точность всех вычислений: ее значение должно быть равным сумме значений знаменателей графы 4, то есть $w_c = \sum n \cdot 20\beta_{\text{рад}}$.

В нашем примере: $51,701 = 2,210 + 14,865 + 34,626 = 51,701$.

Построение углограммы выполняется отложением расстояний согласно точкам разбивки кривой по оси абсцисс в масштабе 1:1000 и углов в радианной мере в масштабе 1см – 0,02 радиана. Значение углов берут из графы 7 ведомости и уменьшают в 20 раз. Они откладываются по оси ординат из середины соответствующих хордочек-двадцаток. В точке конца полевых замеров по вертикали откладывается значение угла поворота всей кривой – 0,31358. Соединяя нанесенные точки между собой прямыми линиями, получаем угловую линию существующей кривой (рис. 8).

Положение точки СК определяется по координатам

$$X_{\text{СК}} = w_c / \alpha_{\text{рад}} = 51,701 / 0,31358 = 164,87 \text{ м};$$

$$Y_{\text{СК}} = \alpha_{\text{рад}} / 2 = 0,31358 / 2 = 0,15679.$$

По значениям $X_{\text{СК}}$, являющимся расстоянием от точки конечных замеров, определяется пикетажное положение СК.

$$\text{ПК СК} = \text{ПК9} + 60 - 164,87 \text{ м} = \text{ПК7} + 95,13.$$

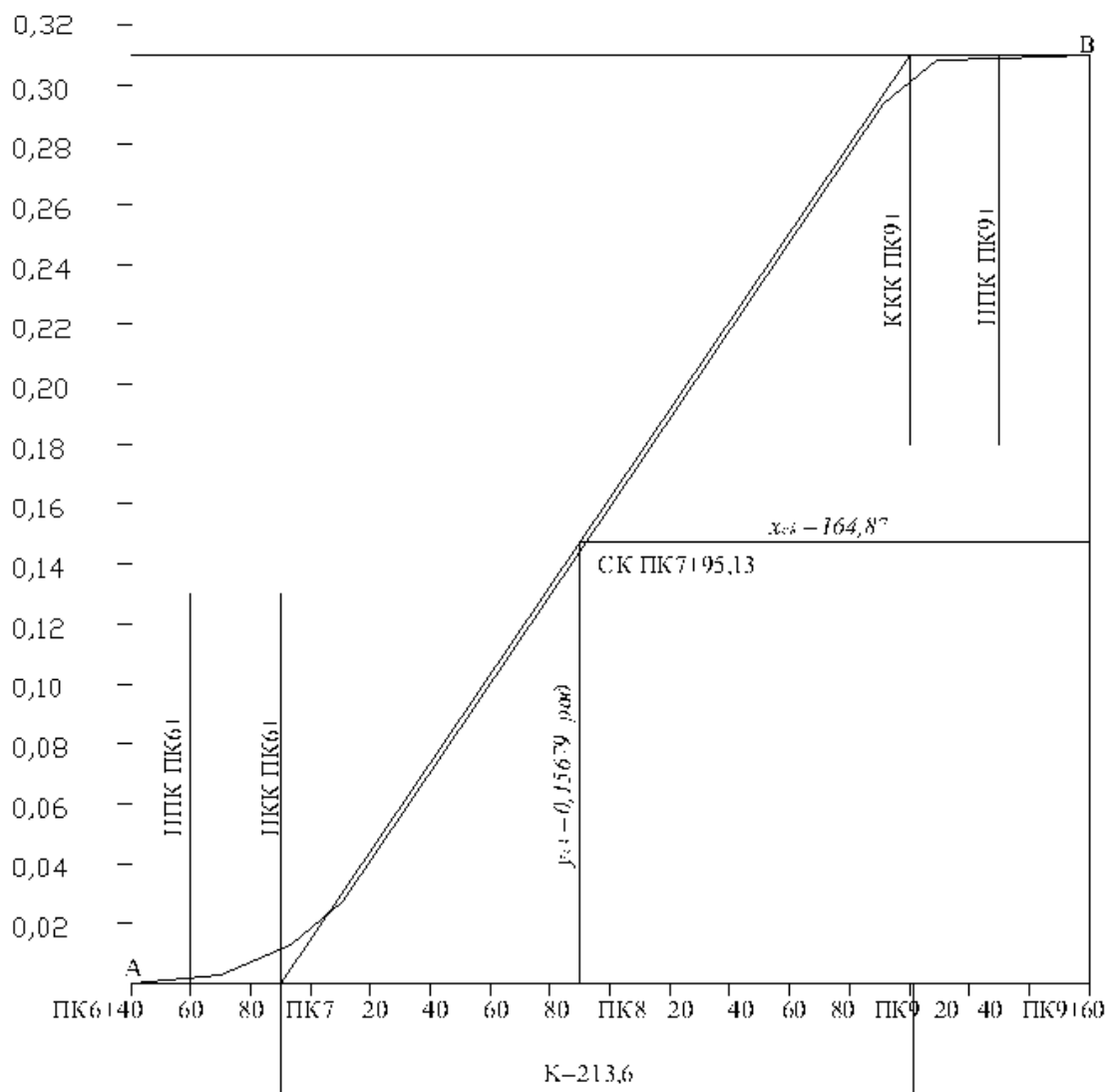


Рис. 8. Угловая диаграмма кривой

По найденным значениям $X_{СК}$ и $Y_{СК}$ наносится на углограмме точка, соответствующая положению на ней середины кривой. Из этой точки проводится угловая линия, максимально приближенная к построенной по данным расчета угловой линии существующей кривой. Измеренное с помощью поперечного масштаба расстояние между точками пересечения угловой линии с горизонтальными линиями, проведенными через точки А и В, равно длине кривой. В рассматриваемом примере $K = 213,6$ м.

По найденному значению длины кривой и измеренному углу поворота определяется радиус кривой

$$R = K / \alpha_{\text{рад}} = 213,6 / 0,31358 = 681,2 \text{ м.}$$

Длины переходных кривых принимаются согласно величине возвышения наружного рельса в пределах круговой кривой h и уклону его отво-

да i . При значениях h от 50 до 60 мм и $i = 1\%$ длина переходной кривой $l = h / i = 60 / 0,001 = 60$ м. Согласно принятой длине переходной кривой наносим на углограмму пикетажное положение ее начала (НПК) и конца (КПК) с учетом, что ее половина устраивается за счет круговой кривой, а вторая половина – за счет прямого пути. Пикетажное положение основных точек кривой вычисляется согласно пикетажному положению середины кривой и найденных значений длин круговой и переходных кривых.

$$\begin{aligned} \text{ПК НК} &= \text{ПК НПК}_1 = \text{ПК СК} - (K/2 + l/2) = \text{ПК 7} + 95,13 - (213,6/2 + 60/2) = \\ &= \text{ПК 6} + 58,33; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ПК КК} &= \text{ПК НПК}_2 = \text{ПК СК} + (K/2 + l/2) = \text{ПК 7} + 95,13 + 136,8 = \text{ПК 9} + \\ &+ 31,93; \end{aligned}$$

$$\text{ПК НКК} = \text{ПК СК} - K/2 = \text{ПК 7} + 95,13 - 213,6/2 = \text{ПК 6} + 88,31;$$

$$\text{ПК ККК} = \text{ПК СК} + K/2 = \text{ПК 7} + 95,13 + 213,6/2 = \text{ПК 9} + 01,93;$$

$$\text{ПК КПК}_1 = \text{ПК НК} + l = \text{ПК 6} + 88,33 + 60 = \text{ПК 7} + 43,33;$$

$$\text{ПК КПК}_2 = \text{ПК КК} - l = \text{ПК 9} + 31,93 - 60 = \text{ПК 8} + 71,93.$$

3. СЪЕМКА КРИВЫХ С ОПОРНЫХ ТОЧЕК

В зависимости от цели съемки кривую и примыкающие к ней прямые размечают через 10 или 20 м и закрепляют на шейке наружного рельса с внутренней стороны. На обочине на расстоянии 2–3 м от пути закладывают опорные точки через 60, 80 или 100 м. Съемка выполняется относительно полученных направлений в прямом и обратном направлении (рис. 9).

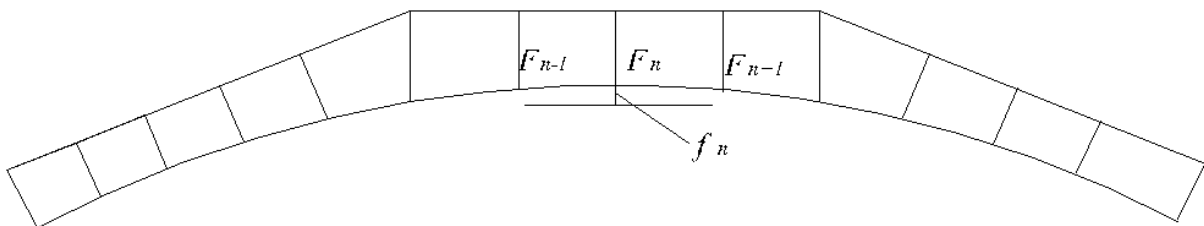


Рис. 9. Съемка кривой с опорных точек

Место установки теодолита и визирного знака определяют промером от рабочей грани наружного рельса с точностью до 1 мм. Углы поворота опорного хода измеряются теодолитом с одновременным измерением расстояний от рельса до линии визирования боковым нивелированием. Стрелы изгиба кривой вычисляют по формуле

$$f_n = (F_{n-1} + F_{n+1}) / 2 - F_n.$$

При наличии реперной системы, пункты которой надежно закреплены с расчетом их эксплуатации в течение длительного периода, имеется возможность рассчитать проектные расстояния от точек разметки кривой до линии, соединяющей два соседних пункта. Разность проектных и измеренных расстояний показывает на имеющиеся отклонения кривой от ее правильного геометрического положения, что позволяет дать оценку плавности кривой и получить данные для ее рихтовки. При разметке десятиметровых отрезков на кривой граница одного из отрезков должна совпадать с началом переходной кривой. Наличие створных пунктов реперной системы позволяет надежно определять все характерные точки кривой и при необходимости восстанавливать точки разметки.

Работу по определению отклонений эксплуатируемой кривой от ее проектного положения можно выполнить непосредственно при съемке по найденным отклонениям точек начала и конца переходных кривых и точек напротив рабочих реперов с помощью простейших измерительных приборов.

Предварительно для каждой точки деления кривой вычисляются проектные значения стрел изгиба в прямоугольной системе координат по формулам детальной разбивки кривой [5].

В пределах переходных кривых стрелы изгиба вычисляются от хорды, стягивающей начало и конец переходной кривой (рис. 10).

$$x_i = K \left(1 - K^4 / 40R^2l^2 + K^8 / 3456R^4l^4 \right),$$

$$y_i = K^3 / 6Rl \left(1 - K^4 / 56R^2l^2 + K^8 / 7040R^4l^4 \right),$$

где K – принятый интервал разметки кривой;

l – длина переходной кривой.

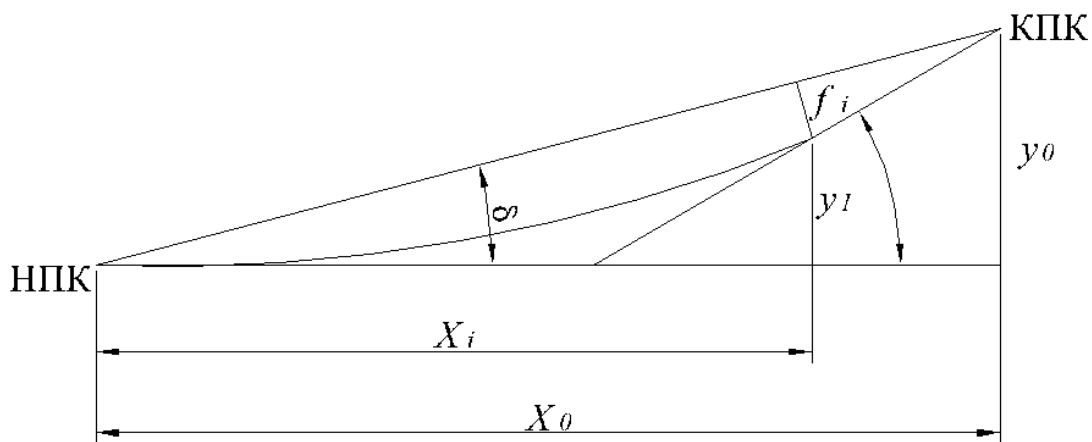


Рис. 10. Определение стрел изгиба на переходной кривой

$$f_i = x_i \sin \delta - y_i \cos \delta;$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{y_0}{x_0},$$

где x_i и y_i – прямоугольные координаты точек переходной кривой от линии тангенса;

d_i и f_i – расстояние и стрелы в точках разметки;

δ – угол между хордой и тангенсом.

В пределах круговой кривой теоретические стрелы в точках разметки от стягивающей фиксированной точки хорды могут быть определены по формуле

$$f_{\text{теор}} = \frac{ab}{2R},$$

где a , b – расстояния от основания стрелы изгиба до концов хорды.

По известным сдвигам в фиксированных точках с помощью оптических или лазерных приборов создается направление теоретического расположения хорды, относительно которой измеряются фактические положения стрел прогиба (рис. 11).

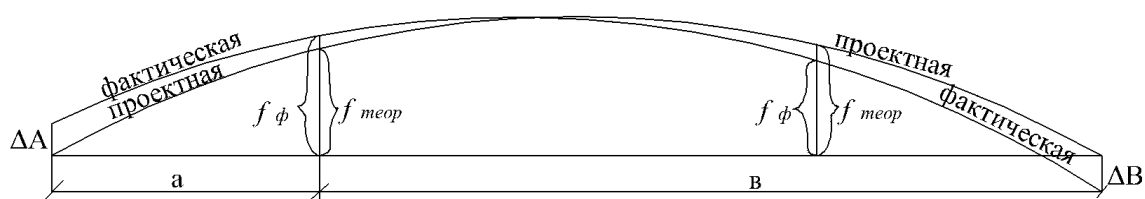


Рис. 11. Определение фактического положения стрел прогиба

ΔA и ΔB – сдвиги (рихтовки) в точке А и В;

f_ϕ и $f_{\text{теор}}$ – фактические и теоретические стрелы в точках разметки.

В фиксированных точках с помощью закрепленной на рельсе реечки с делениями относительно рабочей грани головки рельса фиксируется величина сдвижки для перемещения этих точек в проектное положение. Над одной из точек устанавливается прибор (специальный визир, теодолит, лазерный генератор), а над другой визирная цель, наведением на которую осуществляется создание проектного положения хорды. Относительно этой хорды (линии визирования) с использованием нивелирной рейки определяется фактическое положение рельсового пути в точках разметки. Величины сдвижек в этих точках определяется по формуле

$$\Delta f = f_\phi - f_{\text{теор}}.$$

Причем если разность имеет знак плюс, то рихтовка кривой осуществляется внутрь, а если минус, то наружу.

4. СЪЕМКА КРИВЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ТАХЕОМЕТРОМ

Съемка кривой электронным тахеометром с непосредственным определением координат ее точек может выполняться как с целью определения плавности кривой и выявления ее положения по отношению к проектному, так и только для определения положения на местности ее главных точек. Для подробной съемки кривой предварительно производится разметка двадцати- или десятиметровых отрезков. Для определения положения главных точек кривой на начальном и конечном прямых направлениях фиксируют четыре точки – по две на каждом направлении. На каждом направлении одна из точек должна располагаться вблизи начала или конца кривой, а вторые по возможности как можно дальше от них в направлении от угла поворота. Одна из точек, расположенных вблизи кривой (желательно начальная точка) привязывается к существующему пикетажу железной дороги.

Съемочные работы с использованием электронного тахеометра могут производиться с любой точки, находящейся на прямом участке пути, с одной точки, расположенной вне кривой при наличии видимости как кривой, так и прямых участков пути или – в случае отсутствия видимости – с произвольного базиса, закрепленного внутри или снаружи кривой (рис. 12).

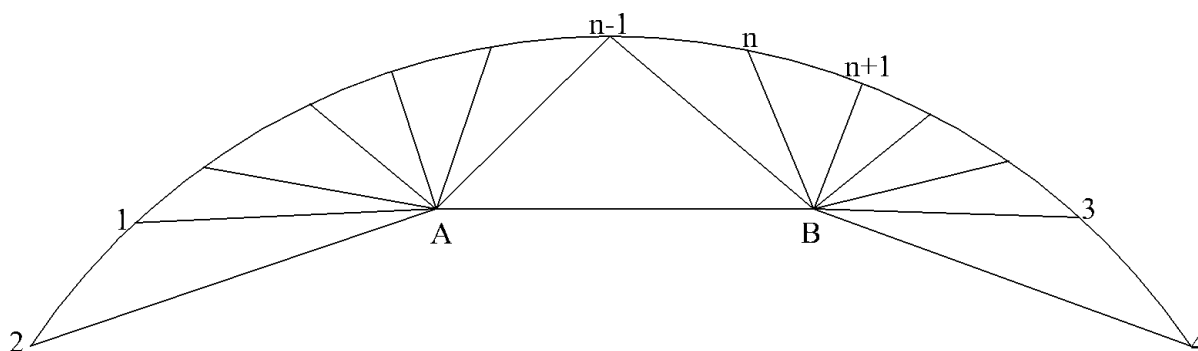


Рис. 12. Схема съемки кривой

Выполнение съемочных работ с установкой тахеометра вне железнодорожного пути не только увеличивает производительность труда в связи с отсутствием необходимости снимать прибор и освобождать путь для пропуска поездов с его последующей установкой и выполнением работ по ориентированию на начальное направление, но и, что наиболее существенно, значительно повышает безопасность геодезической деятельности.

Если съемку выполняют с одной точки, расположенной как внутри, так и снаружи кривой, ей присваивают условные координаты, углы измеряют от произвольного, желательно близкого к направлению тангенса, направления, дирекционный угол которого принимают равным нулю.

При съемке кривой с произвольного базиса или с нескольких точек начальной точке присваивают координаты, дирекционный угол на вторую точку принимают равным нулю и по измеренным расстояниям вычисляют координаты последующих точек.

Для определения угла поворота кривой в выбранной системе координат определяют координаты точек, расположенных на прямых участках пути.

По найденным координатам точек 1, 2, 3, 4 вычисляют углы ориентирования прямых направлений

$$A_{1-2} \text{ и } A_{3-4};$$

$$A_{1-2} = \operatorname{arctg} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

$$A_{3-4} = \operatorname{arctg} \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}.$$

Угол поворота кривой, необходимый для контроля выполненных измерений, получают как разность конечного и начального направлений

$$\alpha = A_{3-4} - A_{1-2}.$$

Координаты вершины угла поворота, находящейся на пересечении двух прямых с найденными координатами, вычисляют по формулам:

$$x_{\text{ВУ}} = \frac{(x_2 - x_1)[x_3(y_4 - y_3) - y_3(x_4 - x_3)] + (x_4 - x_3)[x_1(y_2 - y_1) - y_1(x_2 - x_1)]}{(x_2 - x_1)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)},$$

$$y_{\text{ВУ}} = \frac{(y_2 - y_1)[x_3(y_4 - y_3) - y_3(x_4 - x_3)] - (y_4 - y_3)[x_1(y_2 - y_1) - y_1(x_2 - x_1)]}{(x_2 - x_1)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)}.$$

По найденным координатам вершины угла поворота вычисляются расстояния от угла поворота до точек, лежащих на прямых участках пути, расположенных вблизи начала и конца кривых:

$$d_{(2-\text{ВУ})} = \sqrt{(x_{\text{ВУ}} - x_2)^2 + (y_{\text{ВУ}} - y_2)^2};$$

$$d_{(\text{ВУ}-3)} = \sqrt{(x_3 - x_{\text{ВУ}})^2 + (y_3 - y_{\text{ВУ}})^2}.$$

Главные точки кривой (НК и КК) находятся на расстоянии, равном значению суммарного тангенса T_c от вершины угла поворота.

Для определения величины суммарного значения тангенса необходимо иметь значение радиуса кривой R и длины переходных кривых l , по которым согласно найденному углу поворота определяются значения всех элементов кривой. На эксплуатируемом железнодорожном пути фактическая длина переходных кривых определяется по величине возвышения наружного рельса и уклону его отведения. Радиус кривой вычисляется по координатам ее точек.

При определении длины переходных кривых измеряется величина превышения наружного рельса над внутренним в пределах круговой кривой, где его значение должно быть постоянным. Учитывая допуски на содержание пути, это превышение измеряют в нескольких точках кривой, и для расчета длины переходной кривой принимают его среднее значение. Уклон отвода найденного возвышения вычисляют по измеренным превышениям наружного рельса над внутренним в пределах переходной кривой в двух ее точках, расположенных на расстоянии не менее 30 м друг от друга. По найденным разностям возвышений определяют величину превышения Δh на принятом расстоянии и находят уклон отвода возвышения

$$i = \frac{\Delta h}{d}.$$

Длина переходной кривой, соответствующая определенному отводу возвышения, равна

$$l = \frac{h}{i}.$$

Полученное значение переходной кривой округляется в большую сторону до величины, кратной 10 м. Определение уклона отвода возвышения с последующим определением длины производится на обеих переходных кривых, так как их длины могут отличаться друг от друга.

Для нахождения радиуса кривой определяются координаты трех ее точек, расположенных как можно дальше друг от друга. Если одновременно с определением положения главных точек кривой выполняется ее детальная съемка с предварительной фиксацией отрезков, равных интервалу разбивки кривой, то средняя точка выбирается на равных расстояниях от начальной и конечных точек (рис. 13).

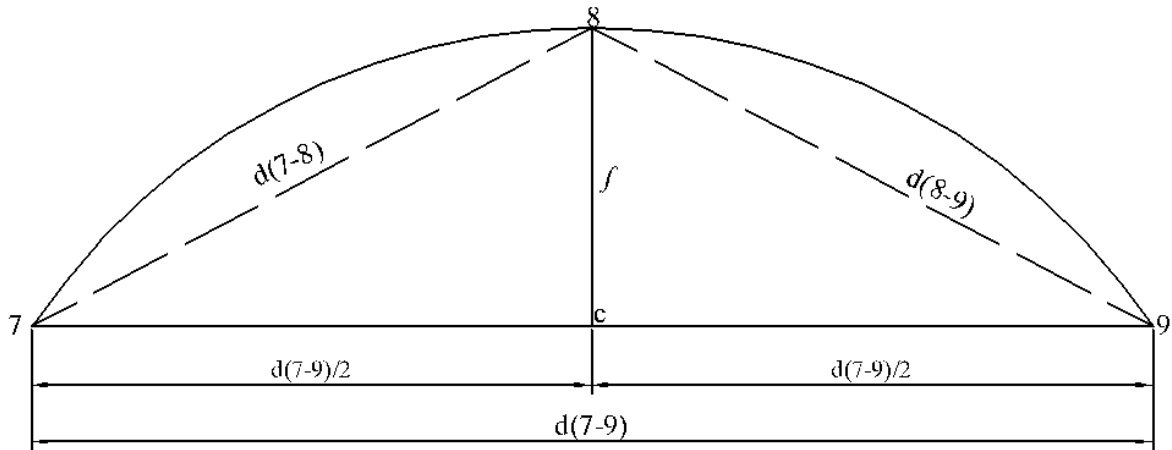


Рис. 13. Определение стрелы прогиба при ее симметричном расположении на отрезке кривой

При симметричном расположении средней точки на кривой относительно крайних точек линии, соединяющие эти точки, образуют равнобедренный треугольник. По координатам вершин этого треугольника определяются длины его сторон

$$d_{7-9} = \sqrt{(x_9 - x_7)^2 + (y_9 - y_7)^2};$$

$$d_{7-8} = d_{8-9} = \sqrt{(x_8 - x_7)^2 + (y_8 - y_7)^2} = \sqrt{(x_9 - x_8)^2 + (y_9 - y_8)^2}.$$

Так как стрела прогиба, являющаяся высотой равнобедренного треугольника, делит его на два равновеликих прямоугольных треугольника,

$$f = \sqrt{d_{7-8}^2 - (d_{7-9} / 2)^2} = \sqrt{d_{8-9}^2 - (d_{7-9} / 2)^2}.$$

Значение радиуса кривой находится по формуле

$$R = \frac{d^2}{8f}.$$

При несимметричном расположении средней точки радиус кривой может быть вычислен непосредственно по формулам аналитической геометрии [6] или косвенно через стрелу прогиба, определяемую как высота треугольника с найденными по координатам длинами всех его сторон.

При определении радиуса кривой по координатам предварительно определяются ординаты центра окружности X_0 и Y_0 (рис. 14).

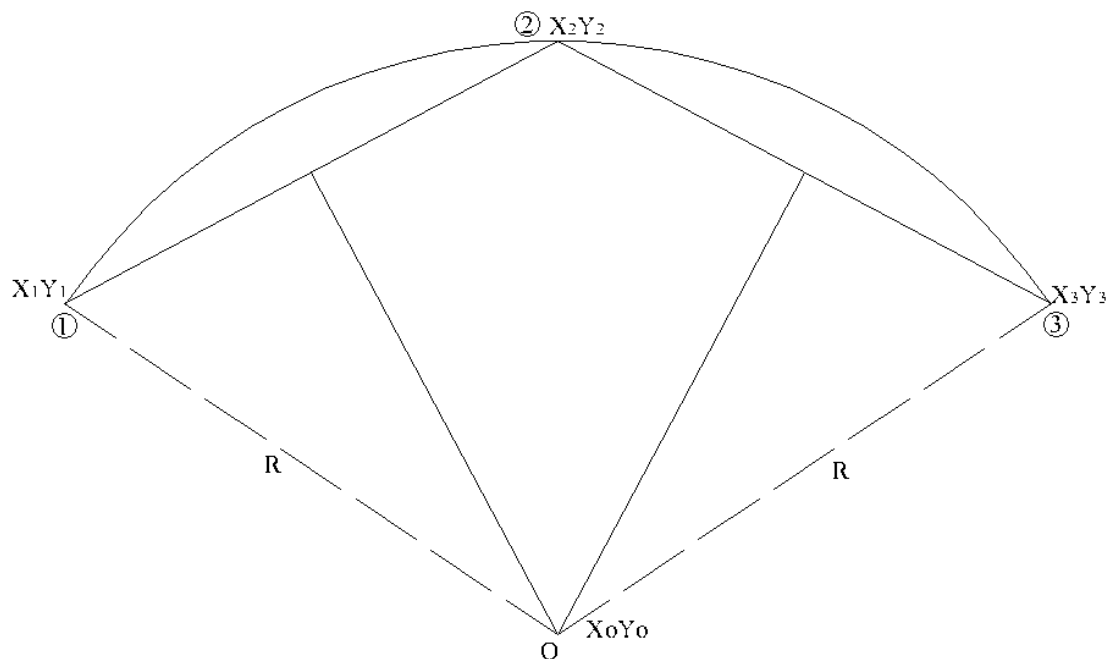


Рис. 14. Схема определения радиуса окружности по координатам трех точек

Координаты центра окружности X_0 и Y_0 вычисляют по уравнениям пересечения двух перпендикуляров, восстановленных из середины хорд, соединяющих соседние точки на кривой, координаты которых определены электронным тахеометром

$$X_0 = \frac{(y_3 - y_2)(x_2^2 + x_1^2 - y_1^2) - (y_2 - y_1)(x_3^2 + y_3^2 - x_2^2 - y_2^2)}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_2 - y_1)]};$$

$$Y_0 = \frac{x_2^2 + x_1^2 - y_1^2 - 2x_0(x_2 - x_1)}{2(y_2 - y_1)}.$$

Значение радиуса кривой может быть вычислено согласно координатам любой из трех точек на кривой.

$$R = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}.$$

Радиус кривой через стрелу прогиба f при несимметричном расположении средней точки (рис. 15) вычисляется по формуле

$$R = \frac{a_1 a_2}{2f},$$

где a_1 и a_2 – расстояния от крайних точек до основания стрелы прогиба.

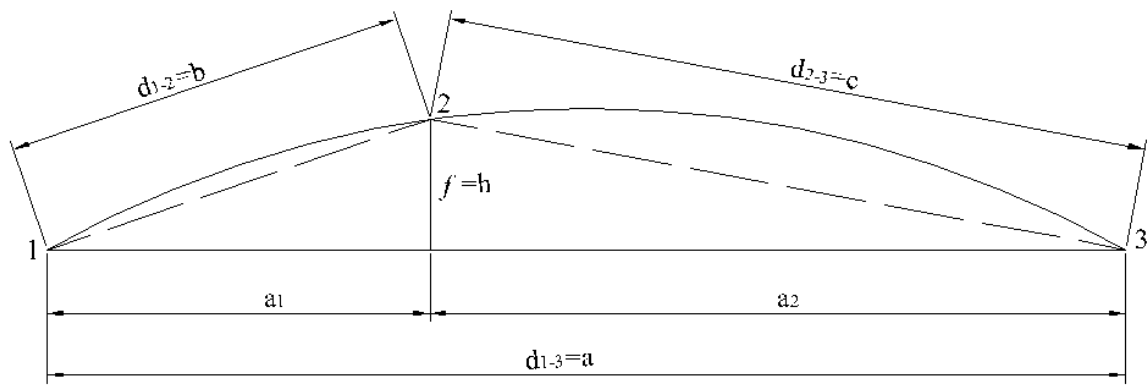


Рис. 15. Определения радиуса кривой при несимметричном расположении средней точки

Так как стрела прогиба f является высотой треугольника 1–2–3 от стороны $d_{1-3} = a$, ее значение может быть определено из формулы площади этого треугольника

$$S = \frac{ah}{2},$$

откуда

$$h = f = \frac{2S}{a}.$$

Площадь треугольника S по длинам его сторон a , b и c находится по формуле

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)},$$

где $p = \frac{a+b+c}{2}$.

Длины сторон треугольника вычисляются по координатам его вершин

$$d_{1-2} = b = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

$$d_{2-3} = c = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2},$$

$$d_{1-3} = a = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}.$$

По найденной стреле прогиба f и длинам сторон b и c определяются расстояния от крайних точек стороны a (точки 1 и 3) до основания перпендикуляра a_1 и a_2 .

$$a_1 = \sqrt{b^2 - f^2},$$

$$a_2 = \sqrt{c^2 - f^2}.$$

Контролем правильности вычислений является равенство $a_1 + a_2 = a$.

Согласно значениям угла поворота α , радиуса кривой R и длины переходной кривой l , вычисляется суммарное значение тангенса T_c [5].

Расстояние от точек, лежащих на прямых участках пути, до точек начала и конца кривых определяется разностью расстояний от них до вершины угла поворота и значением тангенса

$$\Delta d_{2-НК} = d_{2-ВУ} - T_c,$$

$$\Delta d_{ВУ-3} = d_{ВУ-3} - T_c.$$

Отложением этих расстояний в направлении вершины угла поворота восстанавливают главные точки кривой (рис. 16).

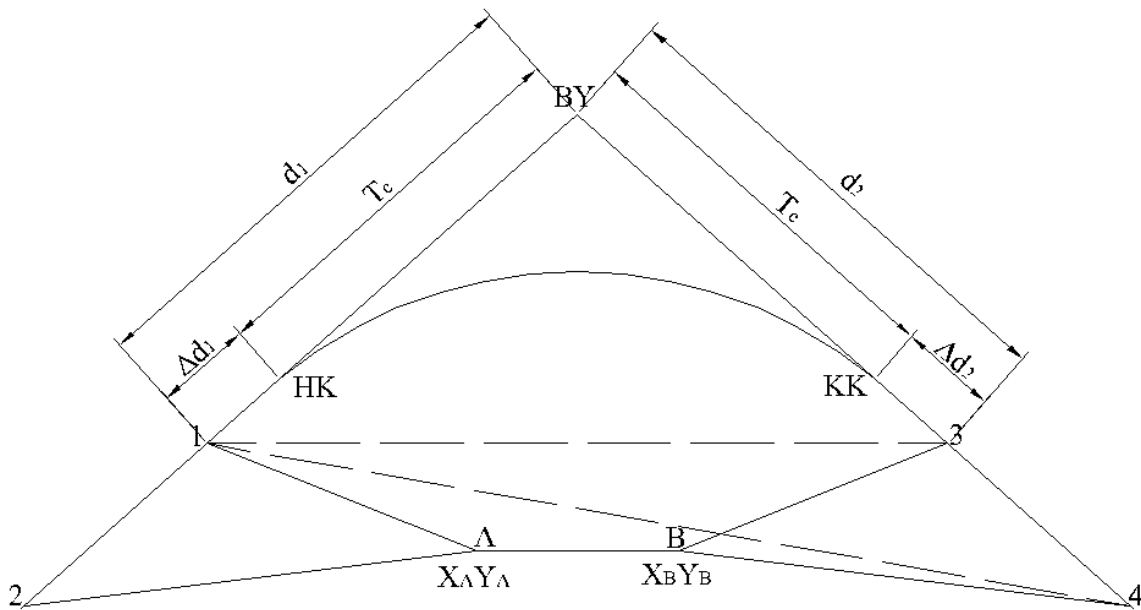


Рис. 16. Определение положения главных точек кривой

Для оценки плавности по найденным координатам точек разметки кривой определяются стрелы прогиба от хорды принятой длины, по которым при помощи специальных расчетов, как и при съемке кривой методом стрел, могут быть определены сдвиги для постановки кривой в правильное, соответствующее техническим условиям положение

$$f_n = \sqrt{\left(\frac{x_{n-1} + x_{n+1}}{2} - x_n\right)^2 + \left(\frac{y_{n-1} + y_{n+1}}{2} - y_n\right)^2}.$$

Подобным образом могут быть определены стрелы прогиба от длинных хорд с определением их углов поворота и последующим расчетом кривой по методу Гоникберга.

Непосредственное определение соответствия фактического положения кривой ее проектному радиусу возможно при выполнении детальной съемки в прямоугольной системе координат с расположением ее центра в точках начала или конца кривой. Работы по съемке кривой выполняются в два этапа. На первом этапе определяются угол поворота, радиус круговой кривой и длина переходной кривой, по значениям которых находится положение начала и конца кривой. При наличии возможности эти работы предпочтительнее выполнять с установкой тахеометра на пути, что позволяет значительно упростить вычислительные работы по определению расстояний от вершины угла поворота до точек на прямых участках. Так, если тахеометр установлен в точке 1, то ее координаты принимаются равными нулю ($x_1 = 0, y_1 = 0$). Выполнив ориентирование на точку 2 с установкой отсчета 180^0 , получаем нулевое значение угла ориентирования в направлении вершины угла поворота по линии тангенса ($A_{2-1} = 0$). При наличии видимости в принятой прямоугольной системе координат относительно тангенса определяются координаты точек, расположенных на втором прямом направлении (точки 3 и 4).

При интенсивном движении поездов или при отсутствии видимости на точки второго прямого направления назначаются дополнительные переходные точки (одна или несколько), расположенные вне пути с хорошим обзором съемки.

Координаты этих точек определяются от начальной точки последовательно до определения координат выходных точек. В этом случае точка начала работ, находящаяся на пути, служит только для однократной передачи координат с минимальным временем нахождения тахеометра на пути.

По найденным координатам точек 3 и 4 решением обратной геодезической задачи вычисляется угол ориентирования этого направления A_{3-4} , который при $A_{2-1} = 0$ равен значению угла поворота α .

Расстояния от вершины угла поворота трассы до ближайших к кривой точек прямых участков пути вычисляются по координатам этих точек. Так как $y_{ВУ} = 0$, то расстояние d_2 от ВУ до точки 3 определяется выражением

$$d_2 = \frac{y_3}{\sin \alpha}.$$

По найденному расстоянию d_2 вычисляется абсцисса угла поворота.

Так как начало координат находится в точке 1, при $x_1 = 0$ и $y_1 = 0$ и угле ориентирования $A_{2-1} = A_{1-ВУ} = 0$ найденное значение абсциссы является расстоянием d_1 от точки 1 до ВУ. Отложением расстояний Δd_1 и Δd_2 находится положение начала переходных кривых.

Перед началом второго этапа съемочных работ выполняется детальная разметка кривой от точек начала и конца кривой к ее середине на принятые отрезки с их закреплением на шейке рельса. Для получения нулевого значения абсциссы в точке начала переходной кривой ее значение в точке стояния тахеометра (точка 1) уменьшается на величину Δd_1 .

При контрольном определении координат точки начала кривой значение x должно быть равным нулю, а отличие значения y от нуля показывает на ее отступление от прямолинейного положения и, следовательно, на величину необходимой сдвижки вынесенной точки.

Координаты точек разметки кривой можно определить с точки стояния тахеометра в точке 1 с перестановкой тахеометра на точку начала кривой с принятием нулевых значений координат и выполнением центрирования с учетом найденной сдвижки Δy или с выносных точек – в случае интенсивного движения поездов, а также при отсутствии видимости снимаемых точек. Координаты выносных точек определяются в принятой системе координат с обязательным последующим контролем по координатам ранее измеренных точек.

Для определения сдвижек кривой согласно принятым значениям угла поворота, радиуса кривой и длины переходной кривой в принятой прямоугольной системе координат относительно тангенса вычисляются координаты всех снимаемых точек[5].

В пределах переходных кривых координаты вычисляются по формулам:

$$x_i = K_i \left(1 - \frac{K_i^4}{40R^2l^2} + \frac{K_i^8}{3456R^4l^4} \right);$$

$$y_i = \frac{K_i^3}{6Rl} \left(1 - \frac{K_i^4}{56R^2l^2} + \frac{K_i^8}{7040R^4l^4} \right).$$

За пределами переходной кривой

$$x_i = R \sin \varphi + m;$$

$$y_i = R(1 - \cos \varphi) + p;$$

$$\varphi_i = \frac{180K_{\text{расч}}}{\pi R};$$

$$K_{\text{расч}} = K_i - \frac{l}{2},$$

где K_i – расстояние от начала кривой до определяемой точки;

$$m = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{l^2}{120R^2} + \frac{l^4}{17280R^4} \right);$$

$$p = \frac{l^2}{24R} \left(1 - \frac{l^2}{112R^2} + \frac{l^4}{21120R^4} \right).$$

Измеряемые при съемочных работах координаты точек разметки кривой должны соответствовать их значениям, найденным теоретически, причем разность фактических и теоретических значений ординат показывает на величину расстройтва пути.

Библиографический список

1. **Инструкция** по текущему содержанию железнодорожного пути. – М. : Транспорт, 2000.
2. **Расчет выправки железнодорожных кривых** : метод. указания / П. С. Пушкин, В. Д. Бельтюков, А. А. Бекиш. – СПб. : ПГУПС, 1997.
3. **Горинов А. В.** Изыскание и проектирование железных дорог / А. В. Горинов, Н. Н. Кантор, А. П. Кондратенко, Н. В. Турбин. – М. : Транспорт, 1979. – Т. 1.
4. **Каменский В. Б.** Содержание железнодорожного пути в кривых / Э. Я. Шац, В. Б. Каменский. – М. : Транспорт, 1987.
5. **Брынь М. Я.** Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых : учеб. пособие / М. Я. Брынь, Н. В. Канахин, В. И. Полетаев. – СПб. : ПГУПС, 2008.
6. **Справочник** по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Изд-во физико-математической литературы, 1995.

Содержание

Введение	3
1. Съёмка кривых методом стрел прогиба	5
2. Съёмка кривых методом измерения стрел прогиба от длинных хорд ...	14
3. Съёмка кривых с опорных точек	23
4. Съёмка кривых электронным тахеометром	26
Библиографический список	36

Учебное издание

ПОЛЕТАЕВ Василий Иванович
ТОЛСТОВ Евгений Георгиевич

СЪЕМКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРИВЫХ

Учебное пособие

Редактор и корректор *Н. Г. Берзина*
Компьютерная верстка *А. В. Никифорова*

Подписано в печать с оригинал-макета 06.10.2011.

Формат 60×84 1/16. Бумага для множ. апп. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,375. Тираж 150 экз.

Заказ

Петербургский государственный университет путей сообщения.
190031, СПб., Московский пр., 9.

Типография ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.